Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Michał Pazdanowski

PROGRAM **ROBOT** w przykładach

Kraków 2011

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jan Kazior

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO WYDAWNICTW DYDAKTYCZNYCH

Maria Misiągiewicz

REDAKTOR SERII
Wydział Inżynierii Lądowej

Jacek Śliwiński

RECENZENT

Wojciech Karmowski

SEKRETARZ SEKCJI
I OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Agnieszka Filosek

SKŁAD I ŁAMANIE

Adam Bania

PROJEKT OKŁADKI

Ludmiła Mikłaszewicz

© Copyright by Politechnika Krakowska, Kraków 2011

ISBN 978-83-7242-608-6

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel.: 12 628 37 25, fax: 12 628 37 60
e-mail: wydawnictwo@pk.edu.pl www.wydawnictwo.pk.edu.pl
Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej.
Ark. wyd. 8,5. Podpisano do druku 30.06.2011 r.

Zam. 288/2012 Nakład 500 egz. Cena zł 16,80 z VAT

Wstęp

Niniejszy podręcznik przeznaczony jest zasadniczo dla studentów ostatnich semestrów studiów pierwszego stopnia na wydziałach Inżynierii Lądowej lub Budownictwa Lądowego, zainteresowanych umiejętnością praktycznej obsługi zaawansowanego narzędzia obliczeniowego, jakim jest system ***Robot***. Jednak z materiałów zawartych w tym skrypcie może korzystać każdy zainteresowany nauką obsługi systemu, jeżeli tylko posiada wystarczającą wiedzę teoretyczną na temat projektowania konstrukcji wykonanych z betonu zbrojonego lub metalu według norm przywołanych w nagłówku każdego ćwiczenia.

Na zawartość merytoryczną skryptu składa się 10 ćwiczeń, ułożonych w kolejności od najbardziej podstawowych (projektowanie prostych konstrukcji ramowych), odwołujących się do elementarnych umiejętności, po bardziej złożone (projektowanie konstrukcji powłokowych) i zaawansowane (analiza dynamiczna), kończąc na projektowaniu fundamentów. Ćwiczenia poprzedzone są krótkim opisem wyglądu głównego okna programu, sposobu dostępu do poszczególnych komend za pomocą systemu ekranów, menu rozwijalnych czy też pasków skrótu.

W nagłówku każdego ćwiczenia podano nowe polecenia i umiejętności, jakie zostaną opanowane przez użytkownika w trakcie wykonywania tegoż ćwiczenia. Zakres materiału do opanowania zawartego w większości ćwiczeń został tak dobrany, aby samodzielne wykonanie pracy zajęło około dwóch godzin lekcyjnych.

Wszystkie wyniki przedstawione w podręczniku zostały uzyskane przy ustawieniach regionalnych i preferencjach zadania prezentowanych na pierwszej karcie opisu każdego z ćwiczeń.

W skrypcie przyjęto następujące konwencje oznaczeń:

1. Nazwy wszystkich poleceń pisane są czcionką półgrubą i kursywą (***Plik → Otwórz projekt...***), przy czym pierwsza nazwa w łańcuchu jest nazwą menu głównego dostępnego bezpośrednio z paska menu rozwijalnych programu;
2. Każdy znak strzałki w tekście nazwy polecenia (→) oznacza przejście do kolejnego, niższego poziomu menu;
3. Wszystkie wartości liczbowe wprowadzane jako dane w odpowiednich oknach dialogowych programu pisane są czcionką półgrubą (**–15,00**);
4. Nazwy okien dialogowych programu pojawiających się w wyniku wykonania stosownych poleceń pisane są kursywą (*Podpory*);
5. Strzałka jasnoszara umieszczona przy oknie dialogowym wskazuje miejsce dokonania wyboru lub wprowadzania danych, zwykle bliżej opisane w towarzyszącym tekście, natomiast strzałka ciemnoszara wskazuje przycisk lub przyciski, których należy użyć, aby kontynuować pracę.

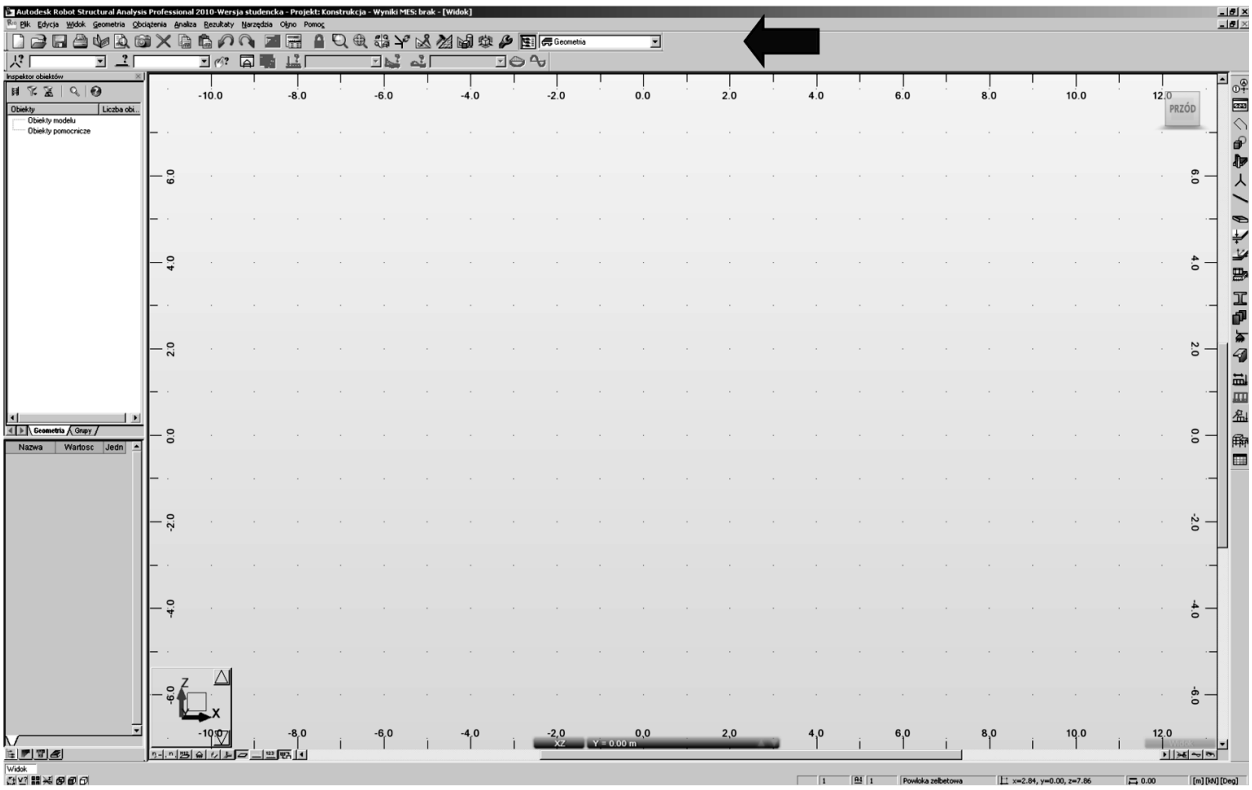
I na zakończenie może jeszcze kilka słów na temat tego, czym na pewno nie jest niniejszy skrypt. Otóż nie jest on podręcznikiem do nauki projektowania konstrukcji żelbetowych czy metalowych, a osoba, która jeszcze nie nabyła umiejętności prezentowanych w ramach tych przedmiotów raczej nie ma szansy na efektywne wykorzystanie jego zawartości.

Michał Pazdanowski
Kraków, 2010

Program Robot

Program może służyć do projektowania, przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych (MES), większości typów konstrukcji spotykanych w inżynierii lądowej (rama, kratownica, ruszt, konstrukcja powłokowa, konstrukcja masywna) oraz wybranych typów elementów konstrukcyjnych (np. belka żelbetowa, słup żelbetowy, fundament, tarcza lub płyta żelbetowa). Istotną cechą programu jest zintegrowanie w jednym pakiecie obliczeniowym modułów służących do wyznaczania rozkładów przemieszczeń, naprężeń i odkształceń w analizowanej konstrukcji (MES) oraz modułów służących do wymiarowania elementów konstrukcji czy też połączeń między nimi, według norm wskazanych przez użytkownika. Przekazywanie informacji pomiędzy modułem analizy MES i modułami wymiarującymi jest w pełni zautomatyzowane, chociaż zainteresowany użytkownik ma możliwość dokonywania ingerencji w ten transfer.

Zasadniczy układ ekranu w programie ***Robot*** wygląda następująco:



Po lewej stronie ekranu znajduje się okno Inspektora Obiektów, w którym umieszczane są listy elementów konstrukcyjnych (pręty, słupy, belki, panele itp.) zdefiniowanych w projekcie. W dolnej części tego okna wyświetlane są informacje szczegółowe o obiekcie wybranym w części górnej okna lub w oknie edytora graficznego.

U góry ekranu znajduje się standardowy w systemie operacyjnym ***Windows*** pasek z nazwą programu, na którym pojawiają się, ważne z punktu widzenia użytkownika, komunikaty programu ***Robot*** o aktualności wyników.

Pod paskiem nazwy umieszczone są nazwy menu rozwijalnych umożliwiających dostęp do wszystkich poleceń systemu. Lista dostępnych menu rozwijalnych jest listą kontekstową i jej wygląd oraz zawartość poszczególnych menu rozwijalnych zależą od wybranej opcji analizy konstrukcji (2D, 3D, powłoka, konstrukcja masywna, ...). Menu rozwijalne w kolejności od lewej to:

1. Plik (operacje na plikach, import danych z innych programów, zrzuty ekranu, kompozycja wydruku i wydruk);
2. Edycja (kopiowanie, zaznaczanie, modyfikacja geometrii);
3. Widok (zmiana widoku konstrukcji, praca 3D, wyświetlanie, tabele);
4. Geometria (typy obiektów, charakterystyki, cechy dodatkowe, numeracja);
5. Obciążenia (przypadki, kombinacje, tabele);
6. Analiza (rodzaje, model obliczeniowy, wymiarowanie);
7. Rezultaty (wykresy, mapy, zbrojenie, analiza naprężeń, tabele);
8. Narzędzia (jednostki i formaty, definicje, preferencje, modyfikacje interfejsu użytkownika, forma notek obliczeniowych);
9. Okno (zarządzanie oknami programu);
10. Pomoc (porady, informacje, pliki pomocy).

Poniżej menu rozwijalnych mogą się znajdować paski z przyciskami skrótów prowadzącymi bezpośrednio do poszczególnych poleceń systemu. Liczba i rozmieszczenie widocznych pasków skrótu zależy od bieżącej konfiguracji systemu i w każdej chwili może być zmieniona przez użytkownika. Paski z przyciskami skrótów są paskami pływającymi i mogą być przez użytkownika dowolnie rozmieszczane w polu pracy. W programie dostępne są następujące paski skrótu:

1. Definicja konstrukcji:

2. Edycja:

3. Edycja obiektów:

4. Model konstrukcji:

5. Narzędzia:

6. Obciążenia specjalne:

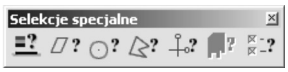
7. Obiekty:

8. Obiekty konstrukcyjne:

9. Opcje generacji siatki Metody Elementów Skończonych:

10. Selekcja:

11. Selekcje specjalne:



12. Standardowy:

13. Widok:

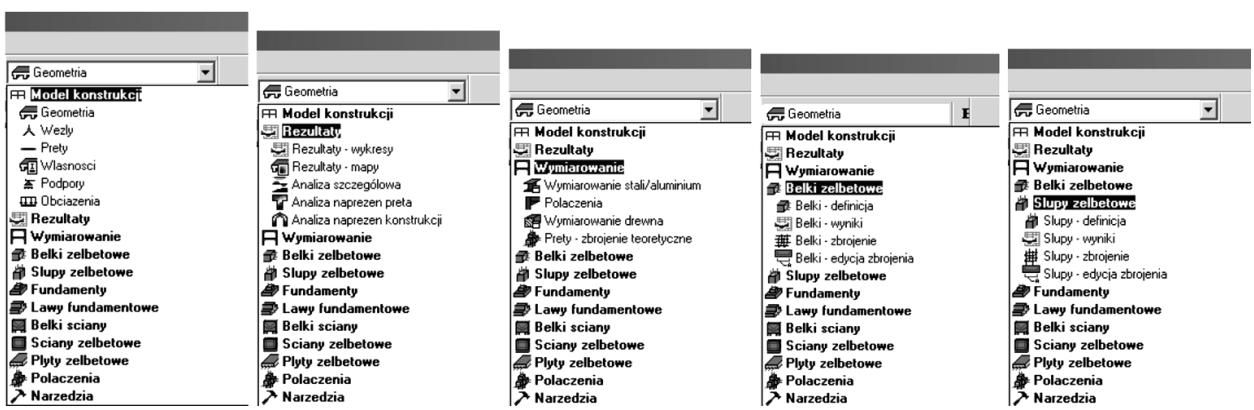
Jeżeli na którymkolwiek z pasków skrótu wybrane ikony mają szary kolor, oznacza to, że przy bieżącym ustawieniu parametrów pracy programu nie są one aktywne.

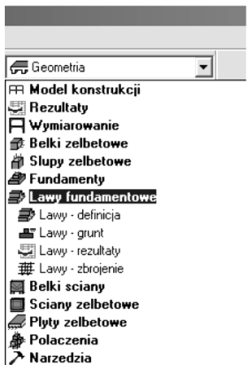
Zasadniczą część okna programu zajmuje pole pracy. Służy ono do definiowania i modyfikacji geometrii projektowanej konstrukcji, rozmieszczania obciążeń i prezentacji wyników obliczeń. W lewym dolnym rogu pola pracy umieszczony jest symbol menedżera widoku, za pomocą którego możemy dokonać wyboru globalnej płaszczyzny pracy i przełączać się pomiędzy widokami w przestrzeni dwu- i trójwymiarowej, natomiast w prawym górnym rogu tego pola znajduje się narzędzie nawigacyjne, pozwalające na szybką zmianę orientacji widoku konstrukcji. Kliknięcie na wyróżnioną płaszczyznę, krawędź bądź narożnik sześcianu powoduje stosowną reorientację widoku prezentowanego w polu pracy.

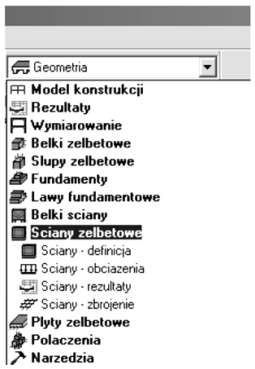
Druga możliwość zmiany sposobu prezentowania konstrukcji w przestrzeni trójwymiarowej wiąże się z wykorzystaniem jednego z czterech dostępnych trybów zmiany widoku:

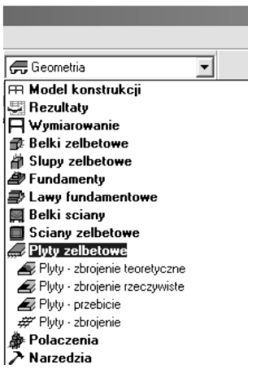
– obrót 3D – obrót wokół osi o dowolnym położeniu w przestrzeni,
– obrót 2D – obrót w płaszczyźnie ekranu,
– powiększ/pomniejsz – przysuwanie lub odsuwanie konstrukcji od płaszczyzny ekranu,
– przesuń – przesuwanie konstrukcji w płaszczyźnie ekranu.

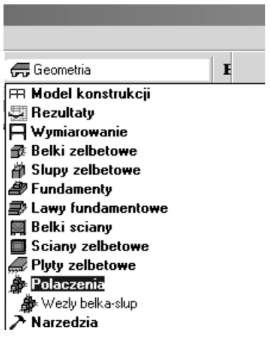
W celu ułatwienia pracy w systemie zdefiniowano system ekranów (*layouts*) (strzałka), służących do wykonywania kolejnych kroków projektowania konstrukcji. Z każdym ekranem skojarzony jest odpowiedni zestaw okien, otwieranych automatycznie w momencie wybrania go i zamykanych przy przechodzeniu na inny. Użytkownik nie może zamknąć żadnego z predefiniowanych okien ekranu samodzielnie. Ekrany poukładane są w logiczny ciąg prowadzący od definicji geometrii i obciążeń (***Model konstrukcji***) przez prezentację wyników obliczeń MES (***Rezultaty***), wymiarowanie elementów metalowych, drewnianych i żelbetowych (***Wymiarowanie***, ***Belki żelbetowe***, ***Słupy żelbetowe***, ***Fundamenty***, ***Ławy fundamentowe***, ***Belki ściany***, ***Ściany żelbetowe***, ***Płyty żelbetowe***) po obliczenia połączeń (***Połączenia***). Każdy z ekranów głównych ma zdefiniowanych kilka ekranów niższego poziomu, związanych ze szczegółami pracy na danym etapie obliczeń. Pełna lista ekranów dostępnych w bieżącej wersji programu została przedstawiona poniżej:











W trakcie pracy w graficznym interfejsie użytkownika, w zależności od wykonywanej operacji, kursor może przyjmować kształt:

– dłoni (manipulacja konstrukcją lub jej elementami),
– krzyża (precyzyjne wskazywanie lokalizacji elementów konstrukcyjnych),
– obiektu geometrycznego (nadawanie atrybutów, definicje podpór, obciążeń).

W programie funkcjonują podstawowe skróty klawiaturowe systemu ***Windows***, czyli w szczególności:

– *Cntrl* + *A* – zaznacz wszystko (wszystkie obiekty w polu pracy),
– *Cntrl* + *C* – kopiuj zaznaczone obiekty do bufora,
– *Cntrl* + *X* – wytnij zaznaczone obiekty do bufora,
– *Cntrl* + *Y* – powtórz ostatnio wykonaną operację,
– *Cntrl* + *V* – wklej zawartość bufora,
– *Cntrl* + *Z* – cofnij ostatnio wykonaną operację.

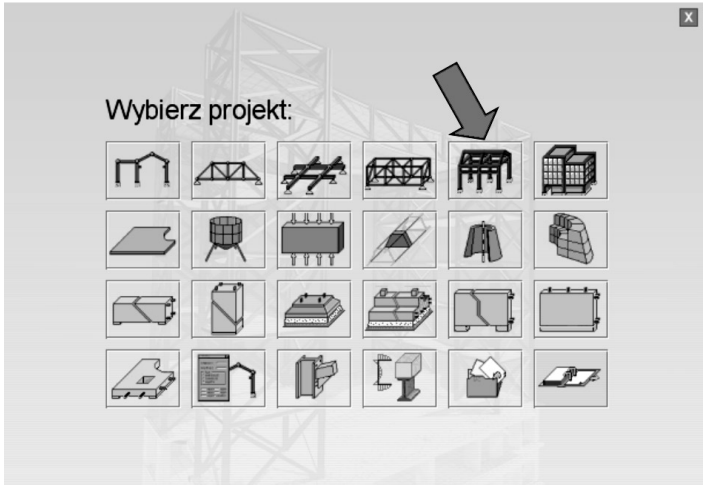
Ponadto warto pamiętać, że zawartość tabel zdefiniowanych w systemie w każdym momencie może zostać przeniesiona do arkuszy kalkulacyjnych programu ***MS Excel***.

Ćwiczenie 1
Rama 3D

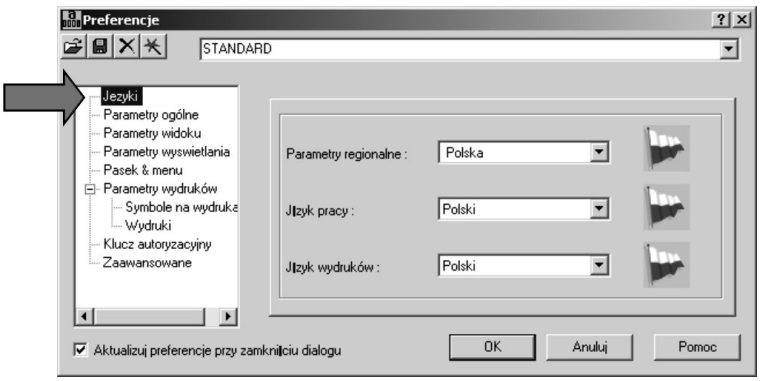
Nowe polecenia: Preferencje, Preferencje zadania, Definicja geometrii konstrukcji, Definicja obciążeń, Kopiowanie konstrukcji, Kombinacje obciążeń, Obliczenia, Prezentacja wyników

1. Konfiguracja programu

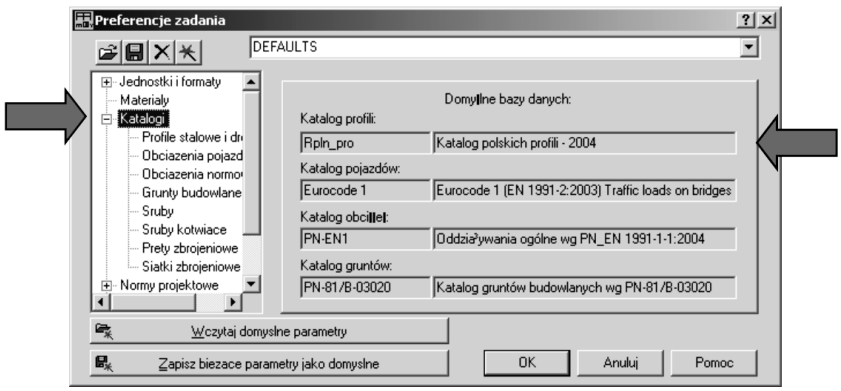
Wybieramy typ zadania – projektowanie ramy przestrzennej:



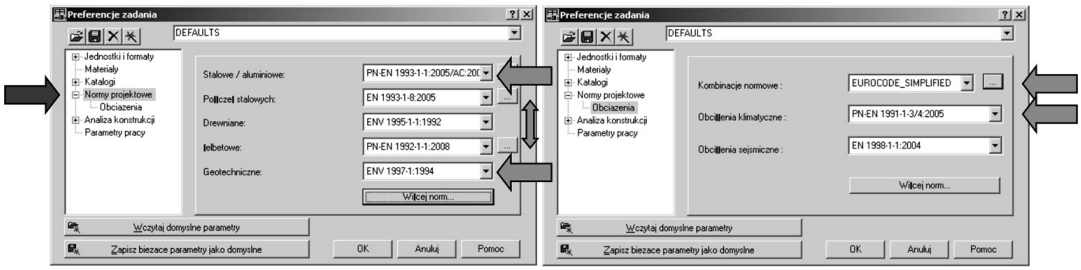
Weryfikujemy ustawienia regionalne (***Narzędzia → Preferencje***):



Ustalamy parametry projektu (***Narzędzia → Preferencje zadania***);
W grupie *Katalogi* sprawdzamy, czy jako podstawowy ustalony jest polski katalog profili RPLN:

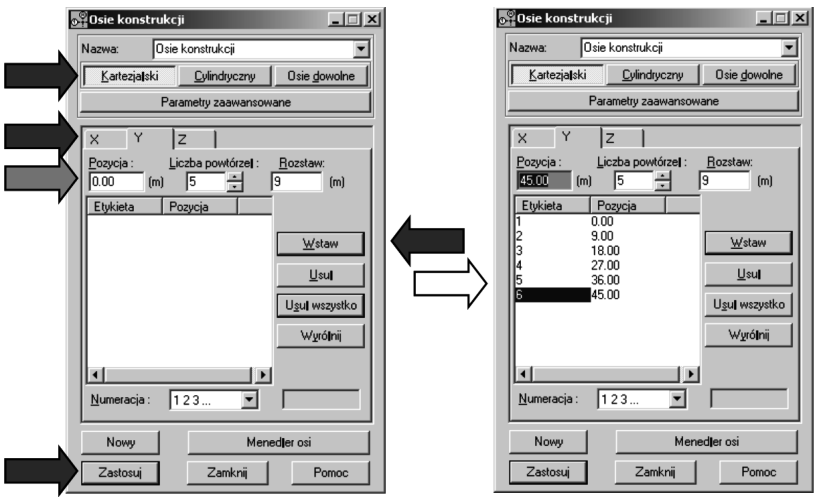


natomiast w grupie *Normy projektowe* ustawiamy aktualnie obowiązujące w Polsce normy, a w podgrupie *Obciążenia* wybieramy normę definiującą reguły tworzenia kombinacji normowych i normy klimatyczne (wyznaczanie obciążenia śniegiem i wiatrem):



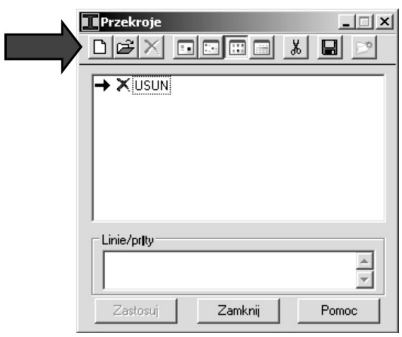
2. Osie konstrukcji

Osie konstrukcji (***Geometria → Osie konstrukcji***) wprowadzamy w sposób następujący:
w kierunku ***X***: 0,00; 11,00; 12,00; 23,00; 24,00 m;
w kierunku ***Y***: 0,00; 9,00; 18,00; 27,00; 36,00; 45,00 m;
w kierunku ***Z***: 0,00; 9,00; 11,00 m;
na odpowiednich zakładkach dialogu *Osie konstrukcji*. Osie wprowadzamy w układzie kartezjańskim (strzałka). Dla przyspieszenia pracy możemy skorzystać z możliwości automatycznego wprowadzania wielu osi w tym samym rozstawie. I tak na przykład, aby uzyskać podane powyżej rozmieszczenie osi w kierunku *Y* w oknach *Pozycja*, *Liczba* powtórzeń i *Rozstaw* należy wprowadzić odpowiednio **0,00**, **5**, **9,00** (lewy rysunek poniżej) i zatwierdzić te dane przyciskiem *Wstaw*. Na zakończenie definicji przyciskiem *Zastosuj* wyświetlamy zdefiniowane osie w oknie graficznym, a przyciskiem *Zamknij* zamykamy okno dialogowe *Osie konstrukcji*.

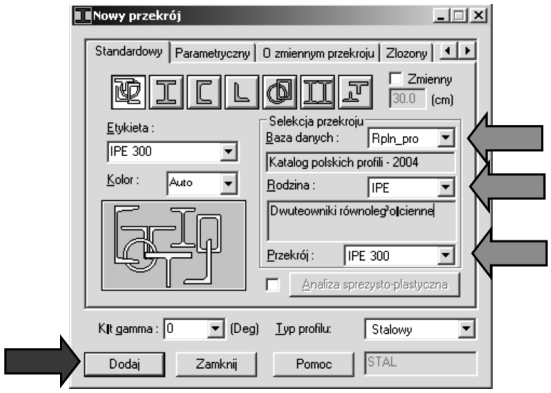


3. Aktywne profile prętów

Do listy aktywnych profili prętów w dialogu *Przekroje* (***Geometria → Charakterystyki → Profile prętów...***) za pomocą dialogu *Nowy przekrój* (otwieranego przez kliknięcie ikony z kartką papieru (strzałka)) dodajemy profile **IPE 300**, **IPE 450**, **IPE 600**:

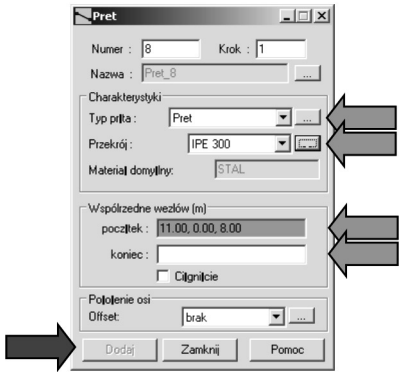


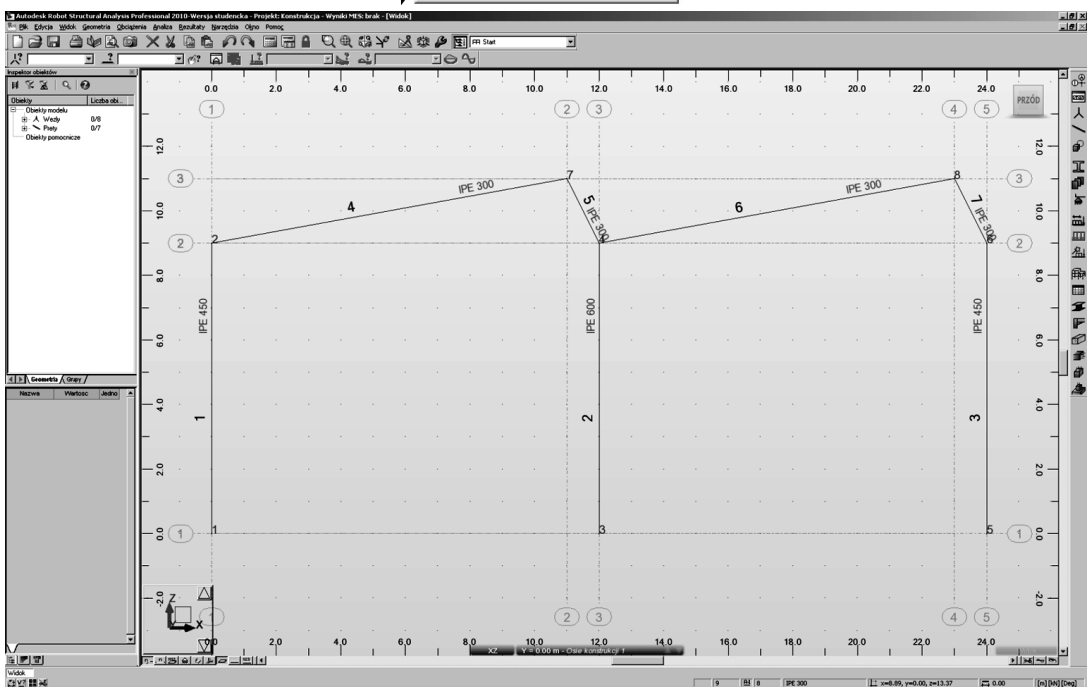
wybierając z *Bazy danych* **Rpln_pro** *Rodzinę* **IPE** oraz wskazując właściwy *Przekrój* **IPE 300**, **IPE 450**, **IPE 600** i zatwierdzając każdy wybór z osobna przyciskiem *Dodaj*:



4. Geometria ramy

W płaszczyźnie ***XZ*** (***Widok → Rzutowanie → Zx***) wprowadzamy pręty według schematu załączonego poniżej. Korzystamy w tym celu z dialogu *Pręt* (***Geometria → Pręty***), w którym dla każdego wprowadzanego pręta w oknie *Charakterystyki* określamy typ normowy (**Słup**, **Belka**, **Pręt,** ...) związany z warunkami weryfikowanymi w trakcie wymiarowania, a w oknie *Przekrój* wybieramy profil kształtownika. Współrzędne początku i końca pręta możemy wprowadzić z klawiatury bądź myszą (grupa *Współrzędne węzłów*). W przypadku wprowadzania łańcucha prętów, dla przyspieszenia pracy, po wprowadzeniu pierwszego pręta w łańcuchu, należy włączyć opcję **Ciągnięcie**. Po wprowadzeniu wszystkich prętów okno zamykamy przyciskiem *Zamknij*.





UWAGA: Numeracja węzłów i prętów jest wprowadzana automatycznie przez program i zależy od kolejności definiowania elementów konstrukcji.

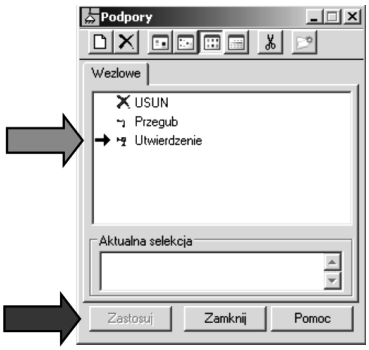
5. Podpory

Podpory konstrukcji (utwierdzenie w węzłach 1, 3 i 5) wprowadzamy za pomocą dialogu *Podpory* (***Geometria → Podpory...***) na jeden z trzech sposobów:

a) wskazujemy węzły kursorem myszy (przy wyborze wielokrotnym stosujemy kombinację klawiszy *Cntrl + lewy*) lub oknem, otwieramy dialog *Podpory* (***Geometria → Podpory...***), wybieramy typ podpory z listy, zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj* lub

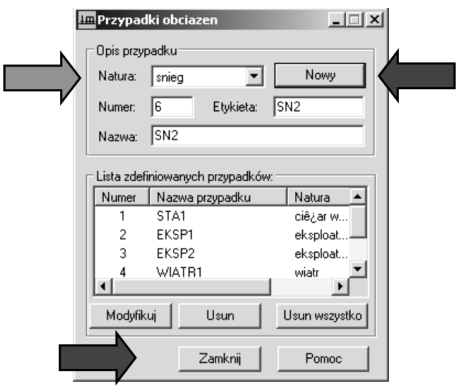
b) otwieramy dialog *Podpory* (***Geometria → Podpory...***), wybieramy typ podpory z listy, wskazujemy okno *Aktualna selekcja*, wskazujemy węzły kursorem myszy (*Cntrl + lewy*), zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj* lub

c) otwieramy dialog *Podpory* (***Geometria → Podpory...***), wybieramy typ podpory z listy, wskazujemy węzły kursorem myszy (*lewy*), na zakończenie zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj*.



6. Obciążenia

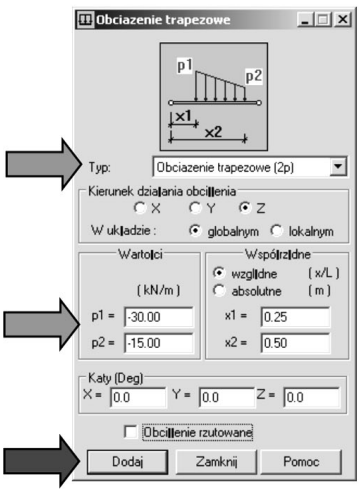
Przed zdefiniowaniem obciążeń działających na konstrukcję musimy określić przypadki obciążenia. Definiujemy je w dialogu *Przypadki* (***Obciążenia → Przypadki...***). Rozważymy przypadki obciążeń ciężarem własnym (***STA1***), obciążeniami użytkowymi (***EKSP1*** i ***EKSP2***), wiatrem (***WIATR1*** i ***WIATR2***) i śniegiem (***SN1***), wybierając *Naturę* przypadku (wiążą się z nią normowe mnożniki obciążenia) i zatwierdzając każdy wybór przyciskiem *Nowy* (etykiety i numery nadawane są automatycznie, jednak w razie potrzeby można je zmienić, wpisując właściwe nazwy w odpowiednie okna):

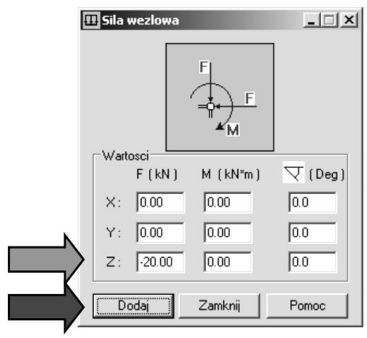


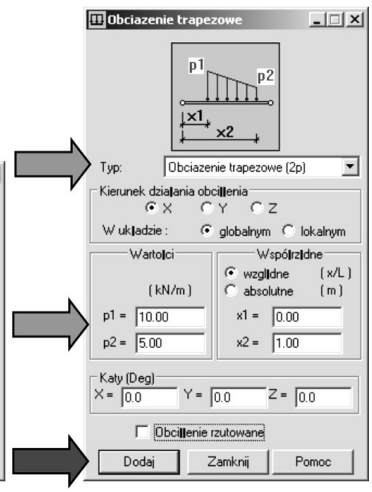
po zdefiniowaniu wszystkich przypadków obciążenia zatwierdzamy je przyciskiem *Zamknij*.

W drugiej kolejności definiujemy obciążenia dla poszczególnych przypadków obciążenia (***Obciążenia → Definicja obciążeń...***), najpierw wybierając przypadek z listy zdefiniowanych przypadków, a następnie dla tak wskazanego przypadku zadając obciążenia:

Typ obciążenia







Eksploatacyjne 1 Eksploatacyjne 2 Wiatr 1 i 2

Eksploatacyjne 1 (trapezowe pionowe na prętach 4 i 6)

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta) i dalej ***Obciążenie trapezowe* (2p)** działające w kierunku osi ***Z*** globalnego układu współrzędnych, *Wartości obciążenia* $p1$ = **–30,00** kN/m, $p2$ = **–15,00** kN/m, *Współrzędne względne* **25%** i **50%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręty 4 i 6 (*Cntrl + lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu lewego końca każdego pręta, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

Eksploatacyjne 2 (pionowe siły skupione w węzłach 7 i 8)

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Węzeł*** (obciążenie węzłowe) i dalej ***Siłę węzłową*** o *Wartości obciążenia* F_z = **–20,00** kN, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy węzły 7 i 8 (*Cntrl + lewy*), akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

Wiatr 1 (obciążenie trapezowe przyłożone do słupa 1)

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta) i dalej ***Obciążenie trapezowe* (2p)** działające w kierunku osi ***X***, *Wartości obciążenia* $p1$ = **5,00** kN/m, $p2$ = **10,00** kN/m, *Współrzędne*

względne **0%** i **100%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręt 1 (*Cntrl + lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu jego dolnego końca, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

Wiatr 2 (obciążenie trapezowe przyłożone do słupa 2)

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta) i dalej ***Obciążenie trapezowe* (2p)** działające w kierunku osi ***X***, *Wartości obciążenia* $p1$ = **–5,00** kN/m, $p2$ = **–10,00** kN/m, *Współrzędne względne* **0%** i **100%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręt 3 (*Cntrl + lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu jego dolnego końca, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

Śnieg 1 (obciążenie prostokątne rzutowane przyłożone do prętów od 4 do 7)

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta) i dalej ***Obciążenie jednorodne*** działające w kierunku osi ***Z***, *Wartości obciążenia* p = **–10,00** kN/m, w układzie globalnym, obciążenie rzutowane zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręty od 4 do 7 (*Cntrl + lewy*), akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

UWAGA: Obciążenia dla przypadku *Ciężar własny* są generowane automatycznie.

Poprawność definicji obciążeń można zweryfikować na podglądzie w postaci tabelarycznej (***Widok → Tabele → Obciążenia***):

	Przypadek	Typ obciazenia	Lista															
	1:STA1	ciezar wlasny	1do7	Cala konstruk	-Z	Wsp=1.00	MEMO :											
	2:EKSP1	obciazenie trapezowe (2	4 6	X1=0.25	PX1=0.0	PY1=0.0	PZ1=-30.0	X2=0.50	PX2=0.0	PY2=0.0	PZ2=-15.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	3:EKSP2	sila wezlowa	7 8	FX=0.0	FY=0.0	FZ=-20.00	CX=0.0	CY=0.0	CZ=0.0	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :					
	4:WIATR1	obciazenie trapezowe (2	1	X1=0.0	PX1=5.00	PY1=0.0	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=10.00	PY2=0.0	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	5:WIATR2	obciazenie trapezowe (2	3	X1=0.0	PX1=-5.00	PY1=0.0	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=-10.0	PY2=0.0	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	6:SN1	obciaz. jednorodne	4do7	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-10.00	globalny	rzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :			
*																		

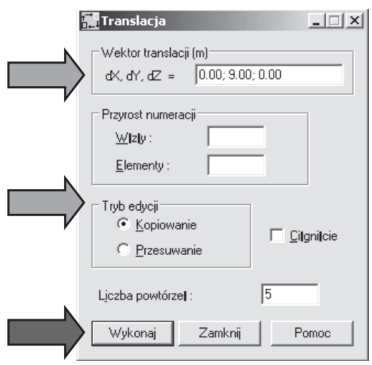
7. Powielenie konstrukcji w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy

Zapisujemy efekty dotychczasowej pracy w pliku *Konstrukcja1.rtd* (***Plik → Zapisz projekt jako...***). Plik ten będzie potrzebny przy automatycznej generacji obciążeń klimatycznych.

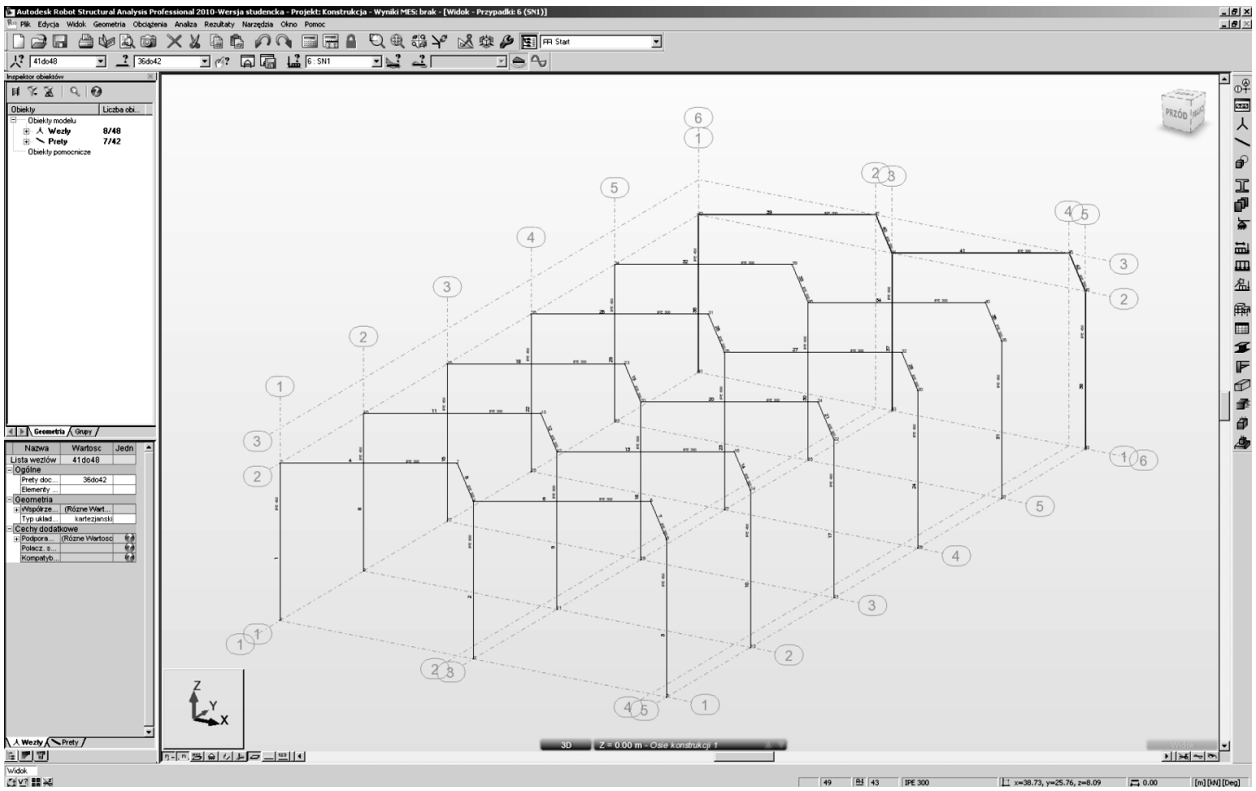
Zmieniamy tryb pracy na trójwymiarowy (***Widok → Praca 3D → 3D xyz***).

Zaznaczamy całość do tej pory zdefiniowanej konstrukcji (*Cntrl + A*).

Kopiujemy konstrukcję (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***):

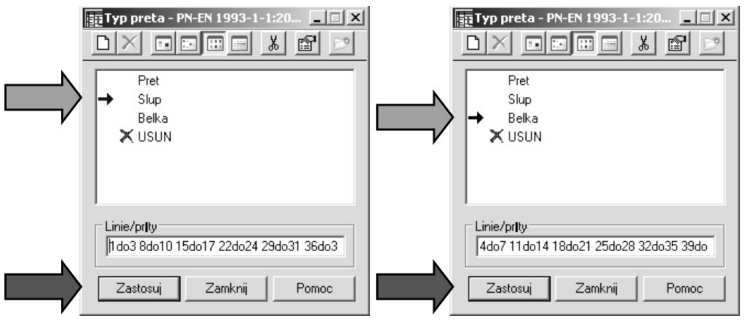


podając jako parametry wektora przesunięcia **0,00**; **9,00**; **0,00**, *Tryb edycji* to **Kopiowanie** z pięciokrotnym powtórzeniem, zatwierdzamy przyciskiem *Wykonaj*. Po wykonaniu operacji konstrukcja winna wyglądać jak poniżej:



8. Zmiana typu prętów

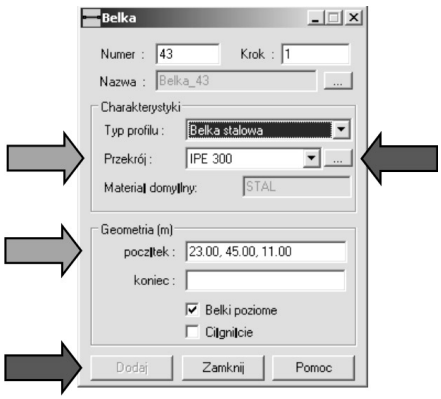
Zaznaczamy wszystkie słupy (oknem lub myszą, używając kombinacji klawiszy *Cntrl + lewy*). Otwieramy dialog *Typ pręta PN-EN 1993-1-1:2005...* (***Geometria → Parametry normowe → Typ pręta stalowego/aluminiowego...***), wybieramy typ pręta **Słup** i zatwierdzamy wybór przyciskiem *Zastosuj*:



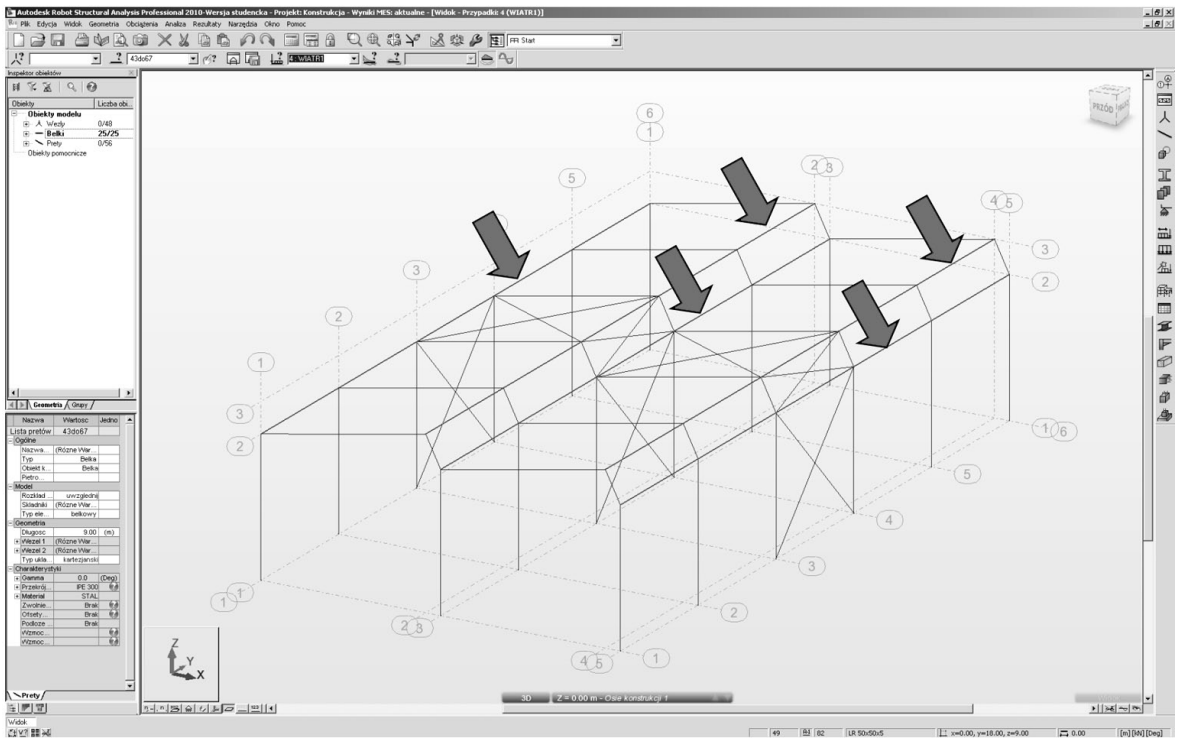
Następnie zaznaczamy wszystkie belki (oknem lub myszą, używając kombinacji klawiszy *Cntrl + lewy*), wybieramy typ pręta **Belka** i ponownie zatwierdzamy wybór przyciskiem *Zastosuj*.

9. Płatwie i stężenia

Dodajemy belki poziome (płatwie), oznaczone strzałkami na rysunku zamieszczonym na kolejnej stronie, (***Geometria → Belki...***) łączące narożniki kolejnych ram i wykonane z profilu **IPE 300**. *Typ profilu* ustawiamy na *Belka stalowa*. Gdyby na liście dostępnych profili nie było pożądanego profilu belki, należy kliknąć na przycisk (...) obok pola *Przekrój* i z okna dialogowego *Nowy przekrój* (patrz punkt 3 powyżej) dodać właściwy profil. Operację rysowania można przyspieszyć zaznaczając opcję **Ciągnięcie** w oknie dialogowym *Belka*.

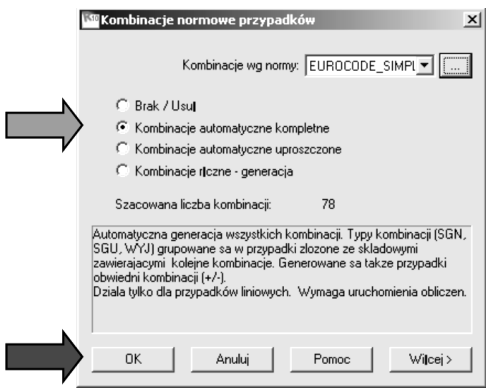


Dodajemy stężenia w polach środkowych pomiędzy ramami w płaszczyznach wyznaczonych przez osie 3-3 i 4-4, jak pokazano na tym samym rysunku. Stężenia winny być wykonane z kątownika stalowego **50 × 50 × 5**, któremu należy przypisać typ profilu *Pręt*. Po wykonaniu wszystkich operacji omówionych powyżej konstrukcja winna wyglądać następująco:



10. Analiza konstrukcji

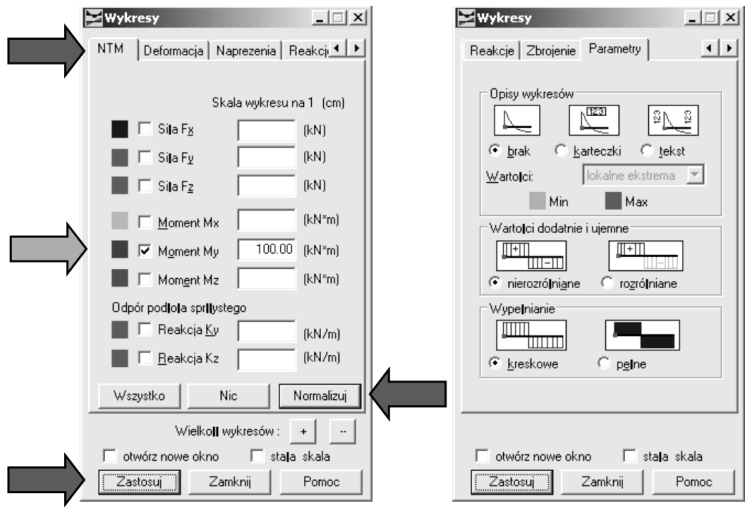
Przygotowujemy kombinacje obciążeń według EC Simplified (***Kombinacje → Kombinacje automatyczne...***), opcja **Kombinacje automatyczne kompletne**. Wybór zatwierdzamy przyciskiem *OK*.



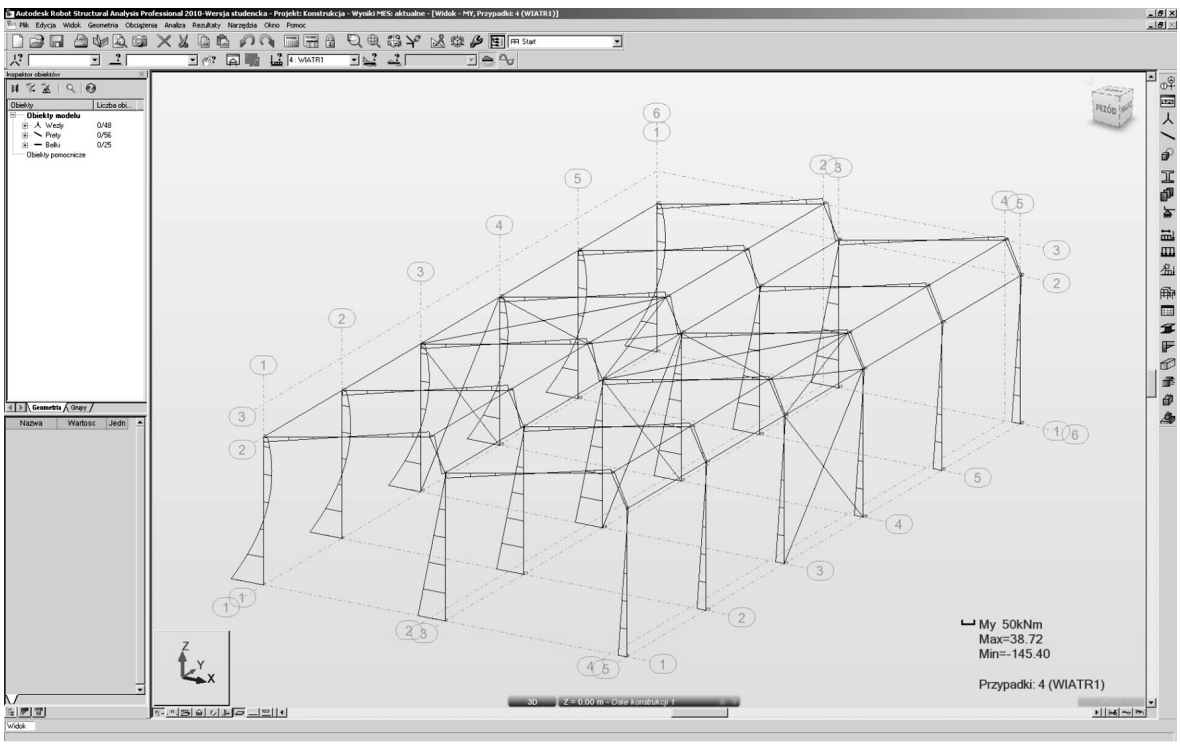
Uruchamiamy obliczenia (***Analiza → Obliczenia***). Po poprawnym zakończeniu obliczeń na górnym pasku pojawia się informacja *Wyniki MES*: *aktualne*.

11. Prezentacja wyników

Z listy zdefiniowanych przypadków obciążenia wybieramy do wyświetlenia ten, który nas interesuje (np. ***WIATR1***), w oknie dialogowym *Wykresy* (***Rezultaty → Wykresy na prętach...***) w zakładce *NTM* wybieramy siłę przekrojową do zaprezentowania, a w zakładce *Parametry* określamy sposób graficznej prezentacji wyników. Przyciskiem *Normalizuj* dobieramy optymalną skalę wykresu:



W przypadku naszej konstrukcji i obciążenia wiatrem z lewej strony wykres momentu M_y wygląda jak na rysunku poniżej.



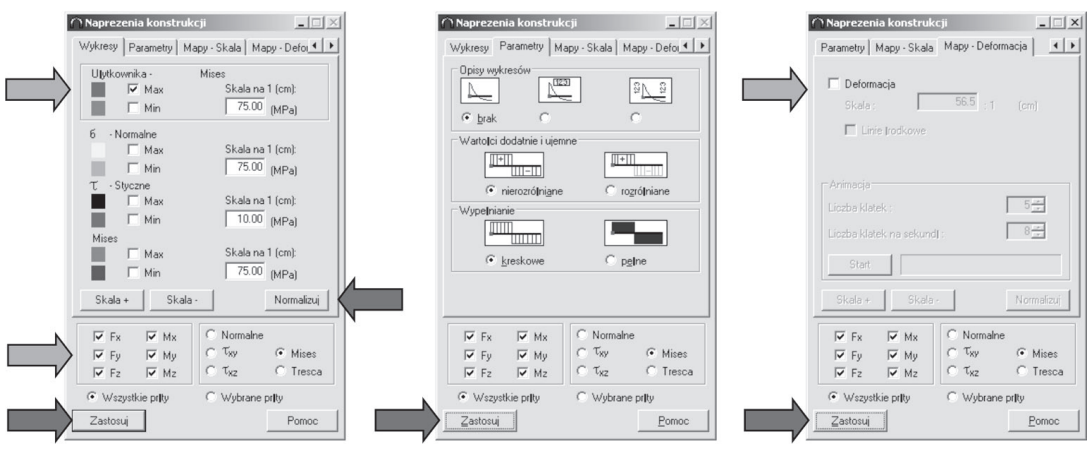
W ten sam sposób można zaprezentować inne siły przekrojowe, jedynie zmieniając przypadek obciążenia na liście wyboru przypadku (strzałka). Wyniki możemy również obejrzeć w postaci tabelarycznej (***Widok → Tabele → Siły***).

Pret/Wezel/Przypadek	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)	Definicja
1/ 1/ SGN/108	**162.14>>**	0.10	-46.88	0.00	145.48	0.30	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
1/ 1/ 4	**-0.31<<**	0.00	48.34	-0.00	-145.40	0.00	
1/ 1/ SGN/107	159.00	**0.10>>**	9.47	0.00	-47.97	0.30	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
1/ 1/ 3	1.18	**0.00<<**	-1.54	0.00	9.41	0.00	
1/ 1/ SGN/37	9.59	0.08	**62.08>>**	0.00	-186.46	0.24	1*0.90 + 4*1.30
1/ 2/ SGN/119	145.39	0.10	**-61.63<<**	0.00	-229.67	-0.59	1*1.10 + 2*1.04 + 3*1.04 + 4*1.17 + 6*1.50
1/ 1/ SGN/120	156.46	0.10	-46.04	**0.00>>**	147.76	0.30	1*1.10 + 2*1.04 + 3*1.04 + 5*1.17 + 6*1.50
1/ 1/ 4	-0.31	0.00	48.34	**-0.00<<**	-145.40	0.00	
1/ 1/ SGN/120	156.46	0.10	-46.04	0.00	**147.76>>**	0.30	1*1.10 + 2*1.04 + 3*1.04 + 5*1.17 + 6*1.50
1/ 2/ SGN/108	154.61	0.10	-46.88	0.00	**-276.42<<**	-0.59	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
1/ 1/ SGN/107	159.00	0.10	9.47	0.00	-47.97	**0.30>>**	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
1/ 2/ SGN/107	151.46	0.10	-60.73	0.00	-243.56	**-0.59<<**	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
2/ 3/ SGN/108	**303.90>>**	0.14	-12.91	-0.00	-15.59	0.42	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
2/ 3/ 4	**-1.95<<**	-0.00	14.13	-0.00	-122.38	0.00	
2/ 3/ SGN/108	303.90	**0.14>>**	-12.91	-0.00	-15.59	0.42	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
2/ 3/ 4	-1.95	**-0.00<<**	14.13	-0.00	-122.38	0.00	
2/ 3/ SGN/85	241.00	0.14	**19.41>>**	-0.00	-271.64	0.42	1*1.10 + 2*1.17 + 4*1.30 + 6*1.20
2/ 3/ SGN/42	41.58	0.11	**-17.49<<**	-0.00	132.41	0.34	1*0.90 + 3*1.17 + 5*1.30
2/ 3/ 6	121.84	0.00	0.28	**0.00>>**	-38.02	0.00	
2/ 3/ SGN/29	19.06	0.14	18.39	**-0.00<<**	-160.30	0.41	1*1.10 + 4*1.30
2/ 3/ SGN/42	41.58	0.11	-17.49	-0.00	**132.41>>**	0.34	1*0.90 + 3*1.17 + 5*1.30
2/ 3/ SGN/85	241.00	0.14	19.41	-0.00	**-271.64<<**	0.42	1*1.10 + 2*1.17 + 4*1.30 + 6*1.20
2/ 3/ SGN/108	303.90	0.14	-12.91	-0.00	-15.59	**0.42>>**	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
2/ 4/ SGN/108	292.00	0.14	-12.91	-0.00	-131.79	**-0.83<<**	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
3/ 5/ SGN/107	**141.34>>**	0.09	45.10	-0.00	-231.52	0.26	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
3/ 5/ 5	**-3.08<<**	-0.00	-48.30	-0.00	131.10	-0.00	
3/ 5/ SGN/107	141.34	**0.09>>**	45.10	-0.00	-231.52	0.26	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
3/ 5/ 5	-3.08	**-0.00<<**	-48.30	-0.00	131.10	-0.00	
3/ 6/ SGN/120	123.34	0.09	**60.80>>**	-0.00	122.19	-0.51	1*1.10 + 2*1.04 + 3*1.04 + 5*1.17 + 6*1.50
3/ 5/ SGN/38	7.48	0.07	**-62.01<<**	-0.00	167.01	0.21	1*0.90 + 5*1.30
3/ 5/ 3	18.80	0.00	1.67	**0.00>>**	-4.95	0.00	
3/ 5/ SGN/32	28.58	0.08	-50.00	**-0.00<<**	102.20	0.26	1*1.10 + 2*1.17 + 5*1.30
3/ 6/ SGN/107	133.81	0.09	45.10	-0.00	**174.36>>**	-0.51	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
3/ 5/ SGN/107	141.34	0.09	45.10	-0.00	**-231.52<<**	0.26	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
3/ 5/ SGN/107	141.34	0.09	45.10	-0.00	-231.52	**0.26>>**	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
3/ 6/ SGN/107	133.81	0.09	45.10	-0.00	174.36	**-0.51<<**	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
4/ 2/ SGN/107	**86.53>>**	0.02	136.48	-0.00	-243.56	0.07	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50
4/ 7/ SGN/14	**0.43<<**	0.02	-1.84	-0.00	-1.96	-0.13	1*0.90
4/ 2/ SGN/29	25.87	**0.02>>**	-2.09	-0.00	20.29	0.07	1*1.10 + 4*1.30
4/ 2/ 6	27.82	**-0.00<<**	57.84	0.00	-104.52	-0.00	
4/ 2/ SGN/108	73.46	0.02	**142.05>>**	-0.00	-276.42	0.07	1*1.10 + 2*1.17 + 3*1.17 + 5*1.04 + 6*1.50
4/ 7/ SGN/109	40.92	0.02	**-104.30<<**	-0.00	-176.66	-0.16	1*1.10 + 2*1.17 + 4*1.04 + 6*1.50

UWAGA: Wartości sił przekrojowych dla przypadków prostych podawane są bez normowych cząstkowych współczynników bezpieczeństwa, natomiast dla kombinacji są wyznaczane z ich uwzględnieniem.
Oznaczenia sił przekrojowych odnoszą się do lokalnego układu współrzędnych, którego oś ***X*** dla pręta pokrywa się z osią podłużną pręta, natomiast układ osi ***Y*** i ***Z*** w przekroju prostopadłym do osi podłużnej zależy od kąta gamma (patrz *Ćwiczenie 2*).

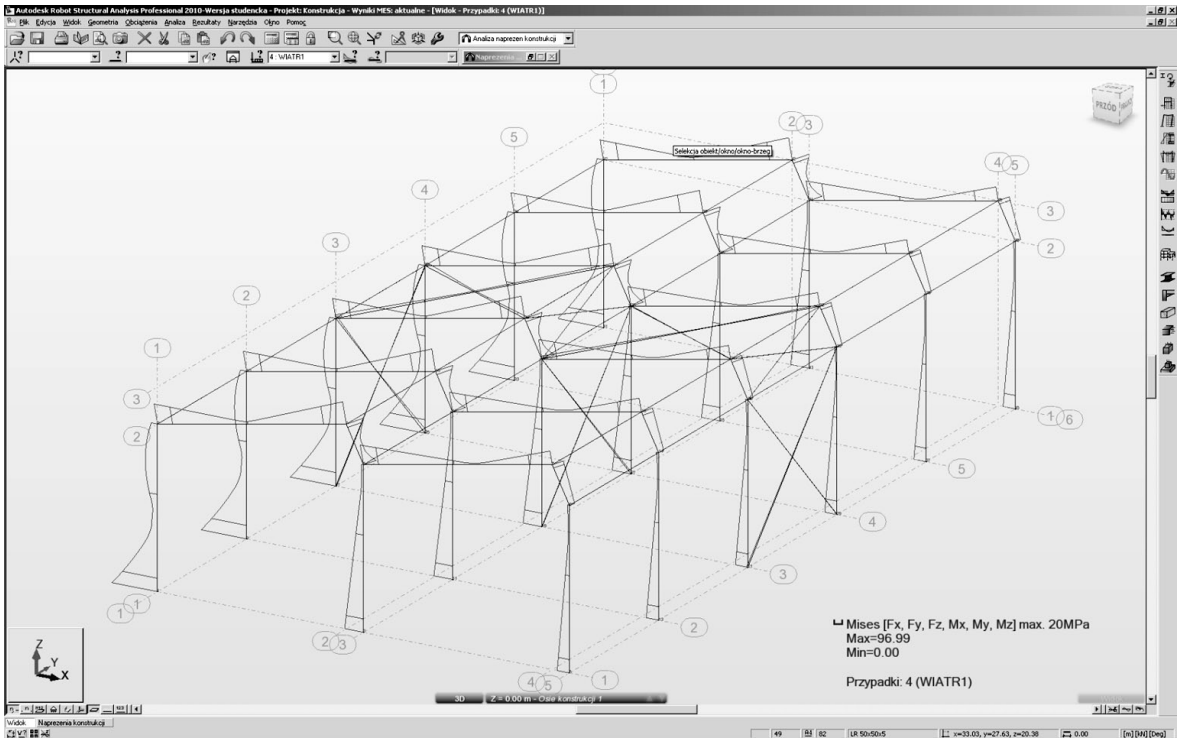
12. Analiza naprężeń

Ekstremalne wartości wybranej składowej tensora naprężenia lub naprężenia zastępczego na długości prętów dla wybranego przypadku obciążenia, lub wybranej kombinacji przypadków prostych możemy zobaczyć, uruchamiając opcję analizy naprężeń (***Rezultaty → Analiza naprężeń → Obliczenia/Wykresy...***). I tak, jeżeli chcemy zobaczyć rozkład maksymalnego naprężenia zastępczego we wszystkich prętach dla obciążenia wiatrem z lewej według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky w oknie zdefiniowanych przypadków obciążenia wybieramy interesujący nas przypadek obciążeniowy (***WIATR1***). W zakładce *Wykresy* okna dialogowego *Naprężenia konstrukcji* (odnoszącego się do analizy naprężeń oraz prezentacji map naprężeń) wybieramy opcję **Max** w polu typu *Mises*. Jeżeli chcemy zmienić tryb prezentacji wyników, możemy to zrobić w zakładce *Parametry*. W zakładce *Mapy-Deformacja* ustalamy, czy mapy naprężeń będą prezentowane na nieodkształconej (deformacje



wyłączone) czy też na odkształconej (deformacje włączone) konstrukcji. W każdym przypadku wprowadzone zmiany zatwierdzamy przez wciśnięcie przycisku *Zastosuj*.

Wykres maksymalnych wartości naprężeń zastępczych obliczonych według hipotezy wytężeniowej Hubera-Misesa-Hencky dla przypadku obciążeniowego ***WIATR1*** powinien wyglądać jak niżej:

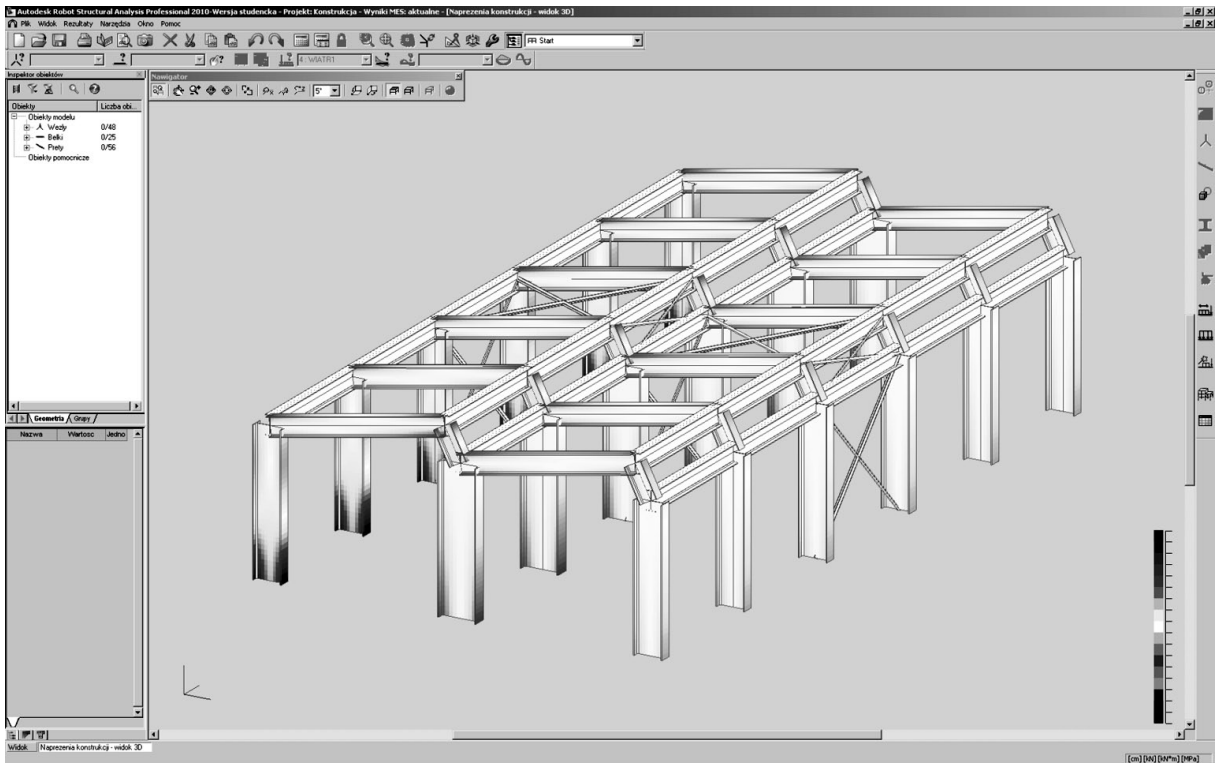


UWAGA: Operacja wyznaczania rozkładów naprężeń w konstrukcji może trwać długo. Zależy to od rozmiarów konstrukcji (liczba elementów prętowych), liczby przypadków obciążeniowych, liczby kombinacji. W trakcie obliczeń pojawiają się kolejno dwa poniższe komunikaty:

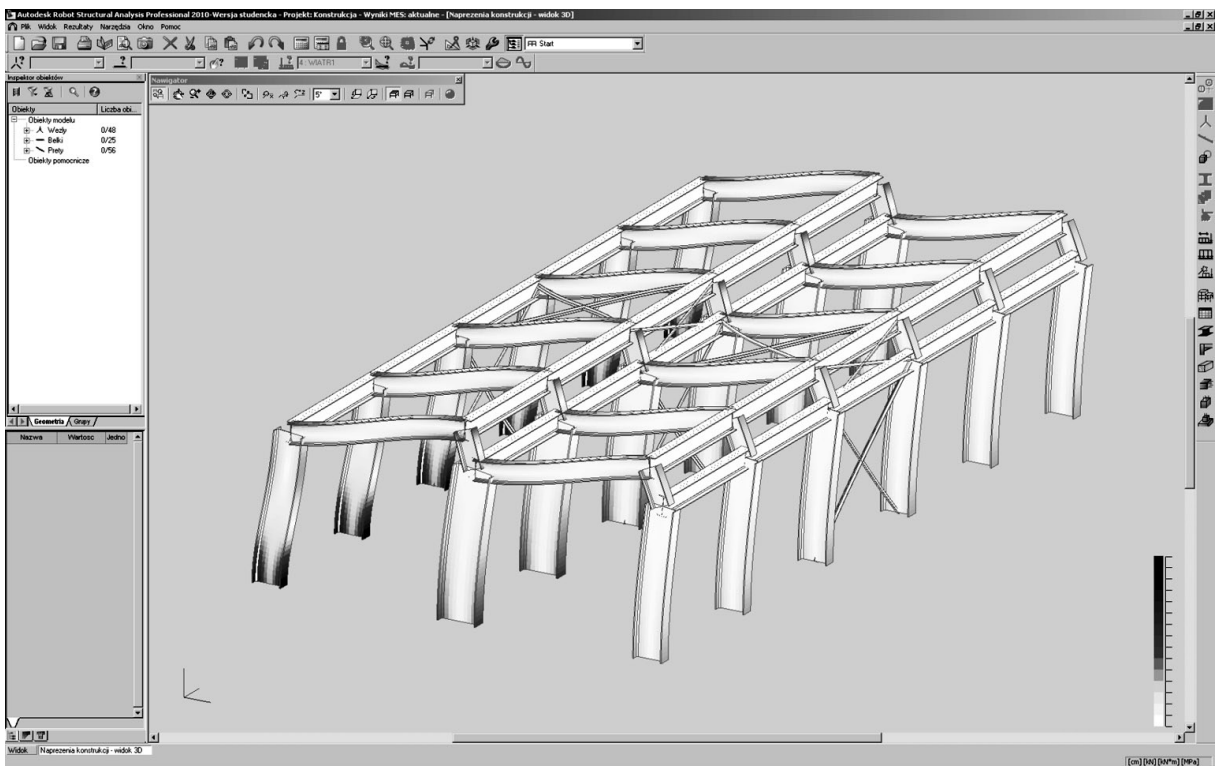
W każdej sytuacji można przerwać obliczenia, używając przycisku *Anuluj*.

13. Mapy naprężeń

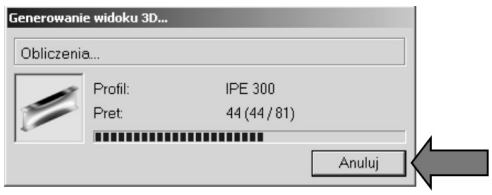
Po wykonaniu analizy naprężeń możemy włączyć prezentację map naprężeń na prętach konstrukcji (***Rezultaty → Analiza naprężeń → Mapy naprężeń***), jeżeli pozostaniemy przy tym samym przypadku obciążenia, wynik powinien wyglądać jak niżej:



Mapa naprężeń z wizualizacją deformacji dla tego samego przypadku obciążenia ***WIATR1*** wygląda następująco:



UWAGA: Również operacja przygotowywania do wizualizacji map naprężeń może trwać długo. W trakcie obliczeń pojawia się następujący komunikat:

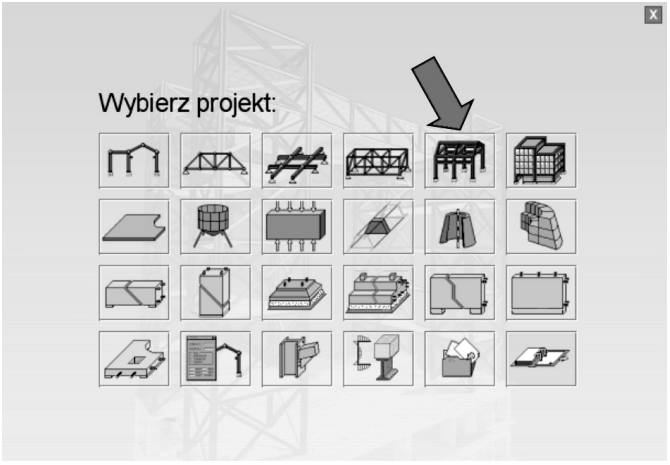


Tak jak poprzednio obliczenia można przerwać, używając przycisku *Anuluj*.
Zapisujemy efekty dotychczasowej pracy w pliku *Konstrukcja2.rtd* (***Plik → Zapisz projekt jako...***).

Ćwiczenie 2
Rama 3D

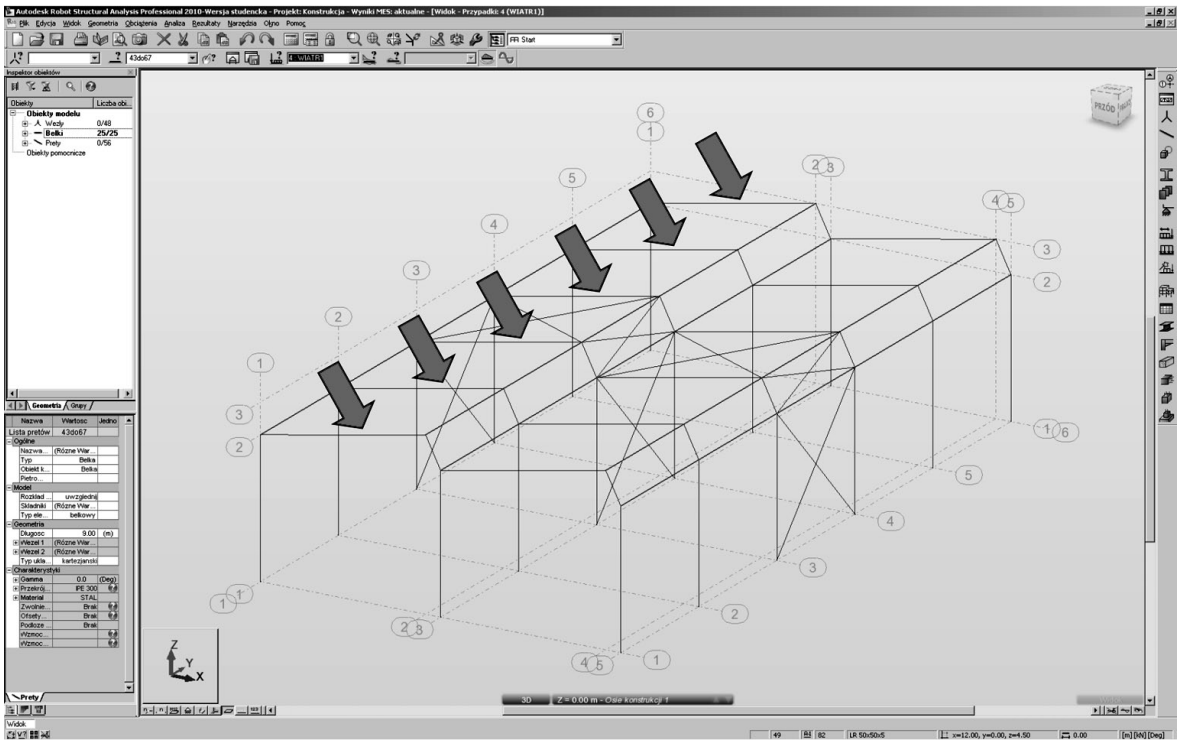
Nowe polecenia: Modyfikacja geometrii konstrukcji, Kąt gamma, Modyfikacja obciążeń, Kombinacje obciążeń, Weryfikacja i wymiarowanie konstrukcji stalowej

1. Konfiguracja programu
Wybieramy typ zadania – projektowanie ramy przestrzennej

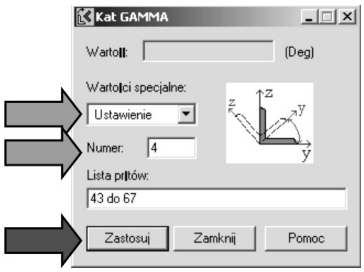


2. Wczytanie ostatnio utworzonej konstrukcji
Otwieramy konstrukcję zapisaną na zakończenie Ćwiczenia 1 (*Konstrukcja2.rtd*) (***Plik → Otwórz projekt...***).

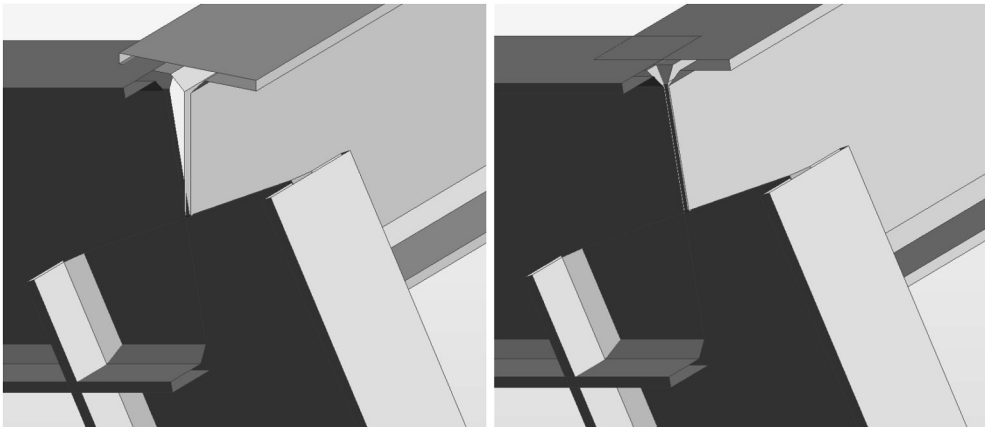
3. Zmiana kąta gamma wybranych prętów
Dostosowujemy kąt gamma wszystkich prętów, których oś podłużna pokrywa się z osią ***Y*** globalnego układu współrzędnych tak, aby ich półki górne leżały w płaszczyźnie połaci dachu. W tym celu zaznaczamy wszystkie pręty, których osie mają właściwy kierunek (np. wskazując myszą i klikając *Cntrl + lewy*):



otwieramy dialog *Kąt gamma* (***Geometria → Charakterystyki → Kąt gamma...***):

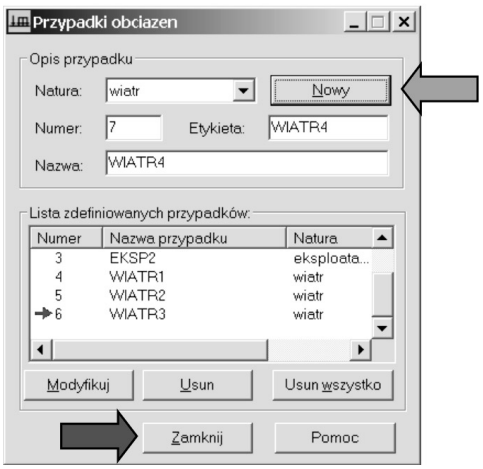


w którym z listy *Wartości specjalne* wybieramy **Ustawienie** (strzałka), w oknie *Numer* wprowadzamy numer pręta, do którego mają być dostosowane ułożenia zaznaczonych prętów (którakolwiek z belek ramy wskazanych strzałką) i akceptujemy przyciskiem *Zastosuj*, zwracając uwagę na to, czy w oknie *Lista prętów* są wpisane numery płatwi, do których odnosi się operacja. Po wykonaniu polecenia połączenia węzłowe winny wyglądać jak po prawej poniżej:

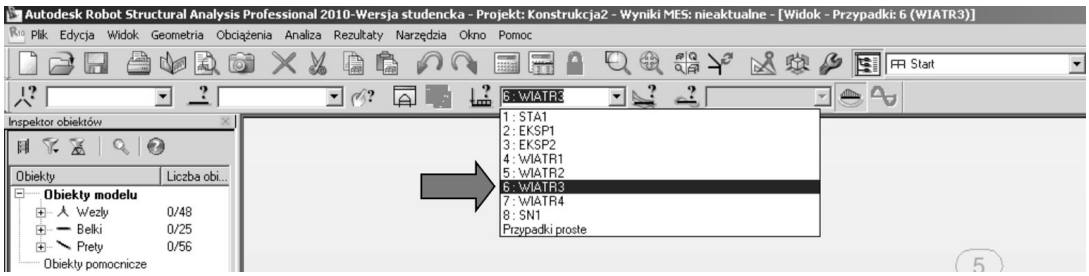


4. Definicja nowych przypadków obciążenia

Dodajemy dwa nowe przypadki obciążenia wiatrem, nazwane ***WIATR3*** i ***WIATR4*** (***Obciążenia → Przypadki...***), przycisk *Nowy* i na koniec akceptujemy przyciskiem *Zamknij*:



Definiujemy obciążenia dla dodatkowych przypadków obciążenia (***Obciążenia → Definicja obciążeń...***), za każdym razem najpierw wybierając przypadek z listy zdefiniowanych przypadków:



WIATR3 (obciążenie trapezowe pionowe w kierunku ***Y*** przyłożone do słupów w płaszczyźnie ***XZ*** określonej przez osie 1-1):

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta) i dalej ***Obciążenie trapezowe*** **(*2p*)** działające w kierunku osi ***Y***, *Wartości obciążenia* $p1$ = **5.00** kN/m, $p2$ = **10.00** kN/m, współrzędne *względne* **0%** i **100%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręty skrajne leżące we właściwej płaszczyźnie (*Cntrl + lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu dolnego końca każdego pręta, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

Po ponownym otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta), dalej ***Obciążenie trapezowe*** **(*2p*)** działające w kierunku osi ***Y***, *Wartości obciążenia* $p1$ = **10,00** kN/m, $p2$ = **20,00** kN/m, współrzędne *względne* **0%** i **100%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręt środkowy leżący we właściwej płaszczyźnie (*lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu jego dolnego końca, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

WIATR4 (obciążenie trapezowe pionowe w kierunku ***Y*** przyłożone do słupów w płaszczyźnie ***XZ*** określonej przez osie 6-6):

Po otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta) i dalej ***Obciążenie trapezowe*** **(*2p*)** działające w kierunku osi ***Y***, *Wartości obciążenia* $p1$ = **–5.00** kN/m, $p2$ = **–10.00** kN/m, współrzędne *względne* **0%** i **100%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręty skrajne leżące we właściwej płaszczyźnie (*Cntrl + lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu dolnego końca każdego pręta, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

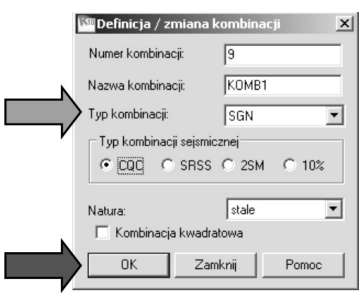
Po ponownym otwarciu dialogu z zakładek wybieramy ***Pręt*** (obciążenie przyłożone na długości pręta), dalej ***Obciążenie trapezowe*** **(*2p*)** działające w kierunku osi ***Y***, *Wartości obciążenia* $p1$ = **–10,00** kN/m, $p2$ = **–20,00** kN/m, współrzędne *względne* **0%** i **100%**, zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*, po zamknięciu okna dialogowego wskazujemy kursorem myszy pręt środkowy leżący we właściwej płaszczyźnie (*lewy*), zwracając uwagę, aby kliknąć w pobliżu jego dolnego końca, akceptujemy przyciskiem *Zamknij*.

Poprawność definicji obciążeń należy zweryfikować w postaci tabelarycznej (***Widok → Tabele → Obciążenia***):

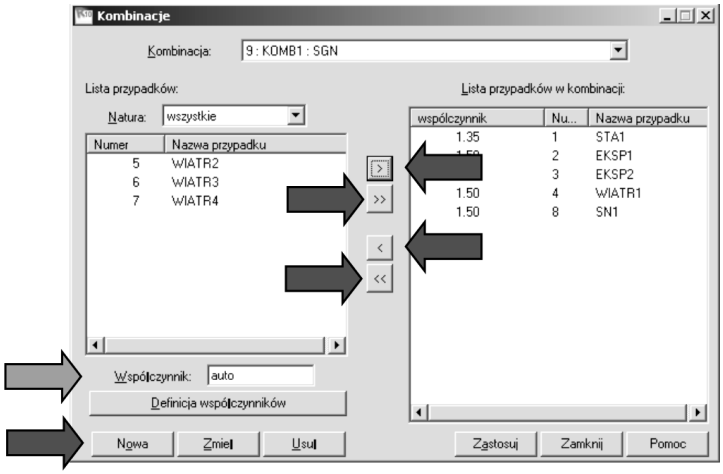
	Przypadek	Typ obciazenia	Lista																
	1:STA1	ciezar wlasny	1do81	Cala konstruk	-Z	Wsp=1.00	MEMO :												
	2:EKSP1	obciazenie trapezowe (2	4do39K7 6do	X1=0.25	PX1=0.0	PY1=0.0	PZ1=-30.00	X2=0.50	PX2=0.0	PY2=0.0	PZ2=-15.00	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	3:EKSP2	siła wezlowa	7do47K8 8do	FX=0.0	FY=0.0	FZ=-20.00	CX=0.0	CY=0.0	CZ=0.0	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :						
	4:WIATR1	obciazenie trapezowe (2	1do36K7	X1=0.0	PX1=5.00	PY1=0.0	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=10.00	PY2=0.0	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	5:WIATR2	obciazenie trapezowe (2	3do38K7	X1=0.0	PX1=-5.00	PY1=0.0	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=-10.00	PY2=0.0	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	8:SN1	obciaz. jednorodne	4do7 11do14	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-10.00	globalny	rzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :				
	6:WIATR3	obciazenie trapezowe (2	1 3	X1=0.0	PX1=0.0	PY1=5.00	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=0.0	PY2=10.00	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	6:WIATR3	obciazenie trapezowe (2	2	X1=0.0	PX1=0.0	PY1=10.00	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=0.0	PY2=20.00	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	7:WIATR4	obciazenie trapezowe (2	36 38	X1=0.0	PX1=0.0	PY1=-5.00	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=0.0	PY2=-10.00	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
	7:WIATR4	obciazenie trapezowe (2	37	X1=0.0	PX1=0.0	PY1=-10.00	PZ1=0.0	X2=1.00	PX2=0.0	PY2=-20.00	PZ2=0.0	globalny	nierzutowane	wzgledne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	MEMO :
*																			

5. Analiza konstrukcji

Przygotowujemy ręczne kombinacje obciążeń (***Obciążenia → Kombinacje ręczne...***):



W oknie *Definicja/zmiana kombinacji* wybieramy właściwy *Typ kombinacji* (**SGN** lub **SGU**) i zatwierdzamy wybór przyciskiem *OK*. W kolejnym oknie, które się pojawi definiujemy składniki i mnożniki kombinacji, klikając klawisze > (wybrany) lub >> (wszystkie), aby dodać komponenty do kombinacji lub < (wybrany) bądź << (wszystkie), aby usunąć komponenty z kombinacji:

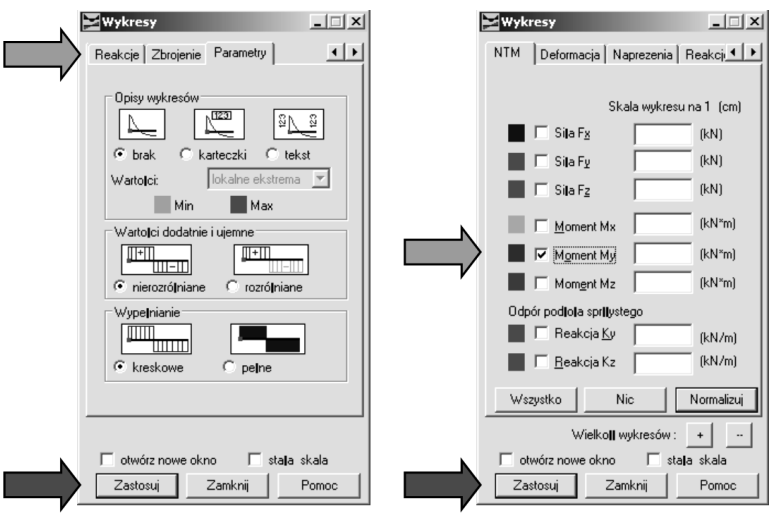


Współczynnik **auto** w powyższym oknie dialogowym oznacza, że dla każdego składnika kombinacji zostanie zastosowany mnożnik normowy przypisany do danego przypadku obciążenia. Utworzymy: cztery kombinacje Stanu Granicznego Nośności (SGN), różniące się przypadkiem obciążenia wiatrem, oraz cztery kombinacje Stanu Granicznego Użytkowania (SGU), różniące się tak jak kombinacje Stanu Granicznego Nośności przypadkiem obciążenia wiatrem. Każdą utworzoną kombinację zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj* lub *Nowa* (program żąda wówczas potwierdzenia zapisu kombinacji).

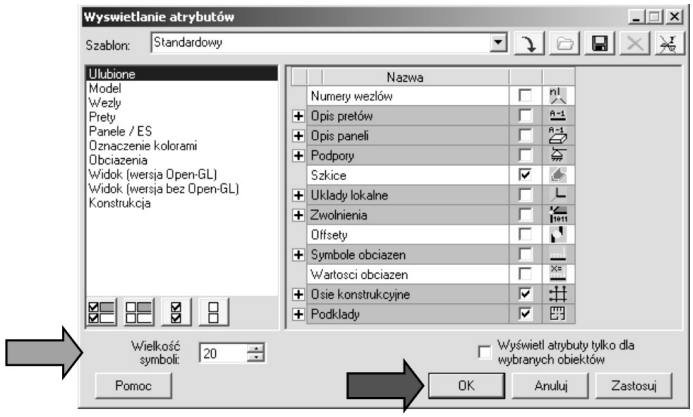
Uruchamiamy obliczenia (***Analiza → Obliczenia***). Po poprawnym zakończeniu obliczeń na górnym pasku pojawia się informacja *Wyniki MES*: *aktualne*.

6. Prezentacja wyników

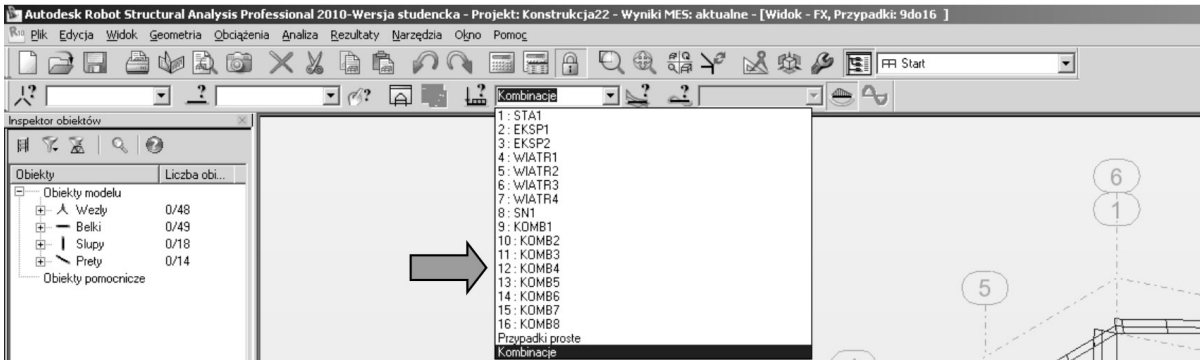
W celu ustalenia formy prezentacji w oknie dialogowym *Wykresy* (***Rezultaty → Wykresy na prętach...***) na zakładce *Parametry* ustalamy sposób prezentacji i etykietowania wykresów. Po ustaleniu formy prezentacji na zakładce *NTM* okna dialogowego *Wykresy* wybieramy te siły przekrojowe, których wykresy chcemy zobaczyć. Jeżeli skala wykresu jest nieodpowiednia (wykres jest nieczytelny) możemy go znormalizować (*Normalizuj*). W każdym przypadku ostateczny wybór zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj*.



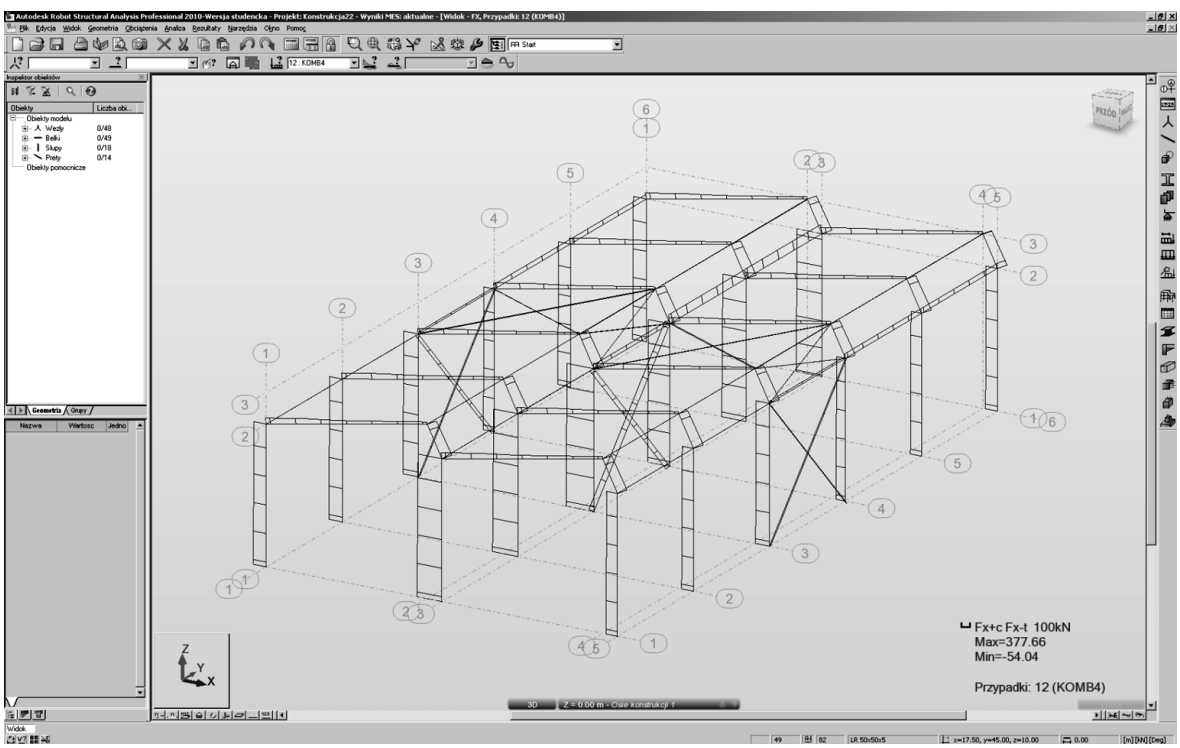
Rozmiar czcionki opisu ustalamy w oknie *Wyświetlanie atrybutów* (***Widok → Wyświetl...***) jako globalny parametr *Wielkość symboli* i zatwierdzamy przyciskiem *OK*.



Oczywiście pamiętamy, że wykres jest prezentowany zawsze dla przypadku obciążenia wskazanego w górnym pasku programu. Dla przypadków prostych wykresy prezentowane są z mnożnikami obciążenia równymi 1, natomiast dla przypadków złożonych z mnożnikami cząstkowymi, takimi jakie zostały określone w definicji kombinacji:



Przykładowy wynik dla jednej wybranej składowej zaprezentowano poniżej:

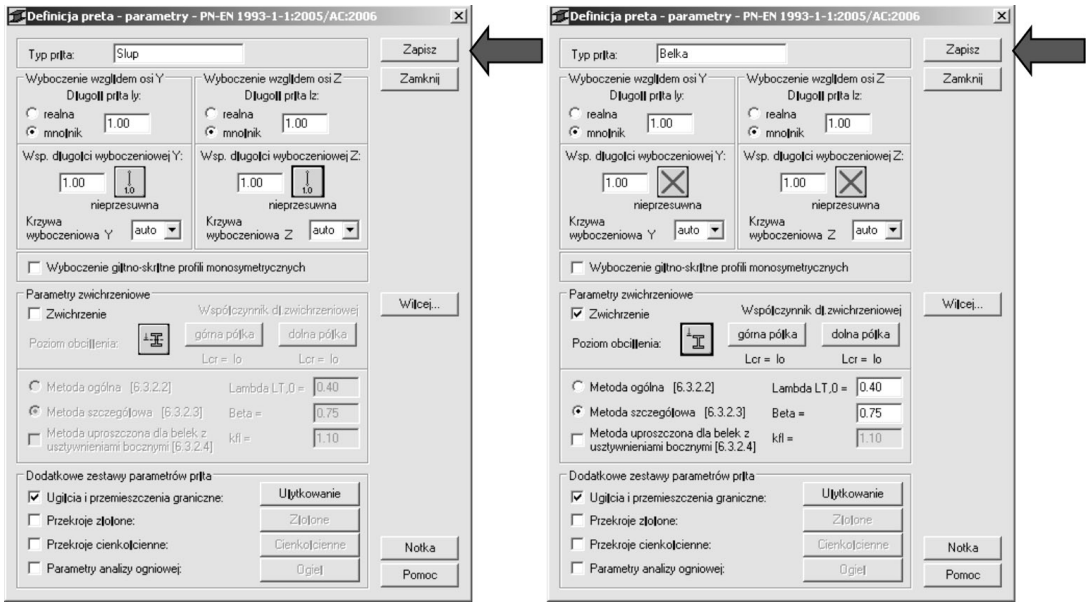


Wymiarowanie konstrukcji

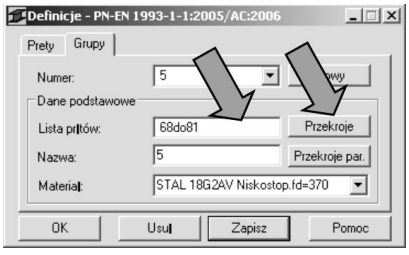
1. Przygotowanie do obliczeń

Zanim przystąpimy do weryfikacji poprawności doboru profili występujących w konstrukcji winniśmy zweryfikować poprawność przypisania parametrów normowych do poszczególnych prętów konstrukcji w oknie *Definicje – PN-EN 1993-1-1:2005...* (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Definicje...***):

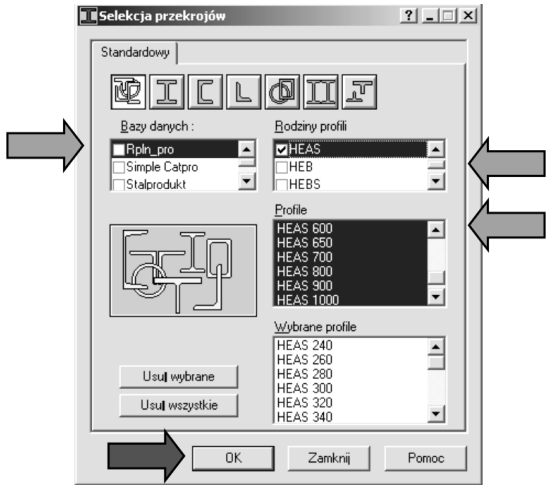
W zakładce *Pręty* możemy nadać każdemu prętowi konstrukcji nazwę, zdefiniować parametry normowe występujących prętów (przycisk *Parametry*), takie jak długość wyboczeniowa (z uwzględnieniem warunków podparcia końców słupa), parametr imperfekcji, parametry zwichrzeniowe (z uwzględnieniem sposobu przykładania obciążenia i warunków podparcia końców belki) dla każdego typu pręta lub dla każdego pręta z osobna:



W każdym przypadku zmiany wprowadzone w oknie definicji pręta akceptujemy przyciskiem *Zapisz*.



Za pomocą zakładki *Grupy* możemy podzielić wszystkie pręty konstrukcji na grupy wykonane z tego samego profilu (np. wszystkie słupy, wszystkie belki, wszystkie stężenia itp.). Dokonuje się tego przez wskazanie myszą bądź wypisanie listy prętów należących do danej grupy w oknie *Lista prętów*. Kolejne grupy tworzy się, wciskając przycisk *Nowy*. Do każdej grupy prętów można przypisać listę dozwolonych profili, wciskając przycisk *Przekroje*. Pojawi się wówczas okno dialogowe *Selekcja przekrojów*:



w którym możemy ustalić, z jakiej rodziny profili będzie dobierany profil dla grupy. Z listy *Baza danych* wybieramy bazę profili do wyboru typoszeregu (**RPLN_PRO**), na liście *Rodziny profili* wskazujemy właściwe rodziny profili, a z listy profili widocznych w oknie *Profile* wybieramy te, które mogą być zastosowane w naszej konstrukcji. Ostateczny wybór zatwierdzamy przyciskiem *OK* i zamykamy okno przyciskiem *Zamknij*. Operację wyboru należy powtórzyć dla każdej grupy osobno, pamiętając, że wszystkim elementom grupy można przypisać tylko jeden profil. W naszym przypadku wprowadzimy pięć grup prętów:

a) słupy skrajne ram w osiach podłużnych 1 i 5, wykonane z profilu **IPE** lub **HEAS**,
b) słupy środkowe ram w osi 3, wykonane z profilu **IPE** lub **HEAS**,
c) belki pomiędzy osiami ram 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, wykonane z profilu **IPE** lub **HEAS**,
d) belki łączące poszczególne ramy w osiach 1, 2, 3, 4, 5, wykonane z profilu **IPE** lub **HEAS**,
e) stężenia w polu między osiami 3 i 4, wykonane z kątownika równoramiennego **LR**.

Operacja przypisania prętów do grup służy zautomatyzowaniu procedury doboru profili w konstrukcji przy jednoczesnym zmniejszeniu różnorodności stosowanych profili.

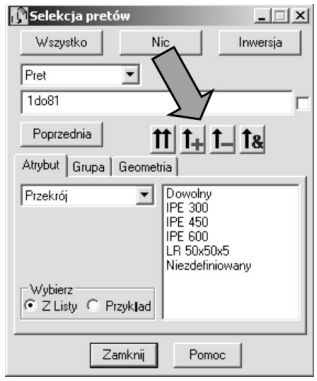
2. Weryfikacja poprawności doboru profili

Weryfikację poprawności przyjętych profili stalowych uruchamiamy z okna *Obliczenia – PN-EN 1993-1-1:2005...* (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Obliczenia...***):

Mamy do wyboru weryfikację prętów (wszystkich lub wybranego podzbioru prętów naszej konstrukcji), weryfikację grup prętów (wszystkich lub wybranego podzbioru) lub wymiarowanie grup, czyli taki dobór profili w grupach, aby najbardziej wytężony pręt w każdej grupie z listy spełniał wszystkie warunki normowe odnoszące się do niego. Na tym etapie możliwe jest określenie, który stan graniczny sprawdzamy (SGN, SGU bądź oba) oraz dodatkowo określenie pomocniczych danych do obliczeń (położenie punktów charakterystycznych w pręcie, parametry obliczeniowe).

UWAGA: W przypadku prowadzenia obliczeń w grupach w jednym przebiegu możliwe jest uruchomienie sprawdzenia tylko jednego stanu granicznego (SGN albo SGU).

Każdorazowo po naciśnięciu przycisku *Lista* pojawia się okno dialogowe, za pomocą którego możemy zdefiniować zbiór elementów konstrukcji, dla którego będą prowadzone obliczenia:

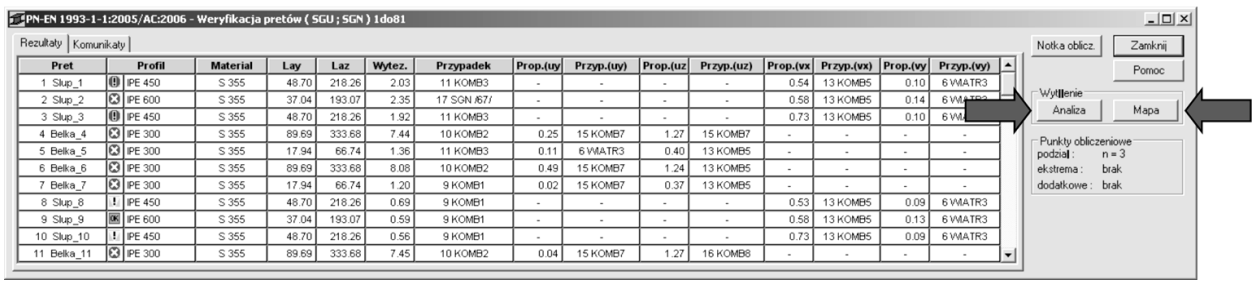


Ikony wskazane strzałką oznaczają odpowiednio usunięcie starej selekcji i wprowadzenie nowej, dodanie obiektów do starej selekcji, odjęcie obiektów od starej selekcji oraz iloczyn logiczny starej selekcji i elementów nowo wskazanych na liście poniżej strzałki. Wybór zatwierdzamy przyciskiem *Zamknij*.

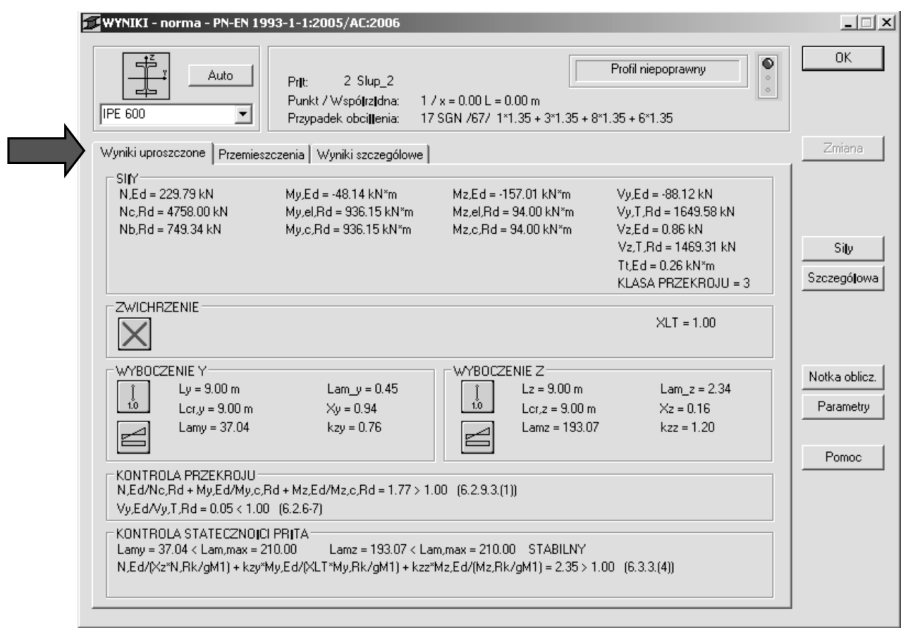
Wciśnięcie przycisku *Lista* znajdującego się w ramce *Obciążenie* umożliwia dokonanie wyboru przypadków obciążeniowych, dla których będzie prowadzona weryfikacja z listy wszystkich zdefiniowanych przypadków prostych i kombinacji. Obliczenia uruchamiamy wyłącznie przyciskiem *Obliczenia*.

3. Rezultaty weryfikacji prętów

Rezultatem weryfikacji prętów jest pojawienie się okna dialogowego pokazującego w skróconej formie wyniki obliczeń:

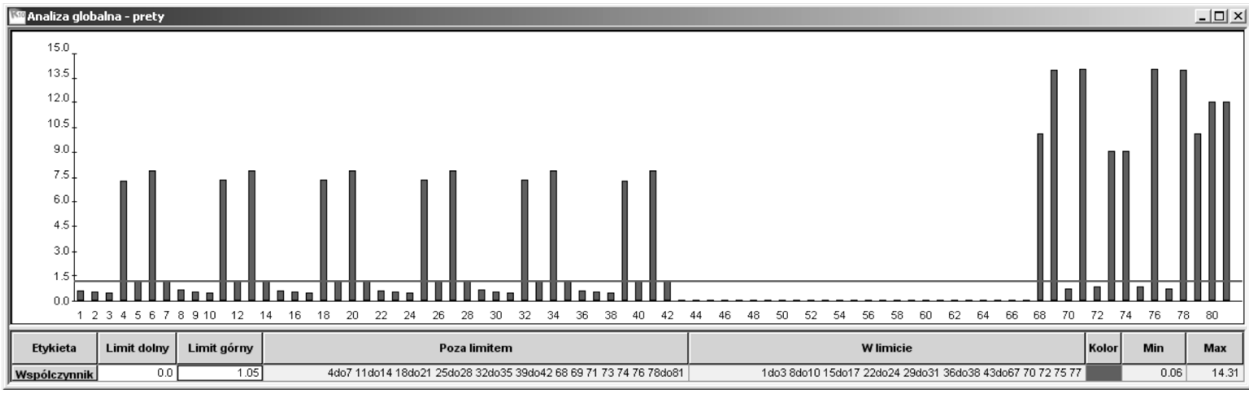


w kolejnych kolumnach powyższej tabeli zawarto informacje o pręcie, Stanie Granicznym Nośności (wytężenie dla najbardziej niekorzystnego przypadku obciążenia), Stanie Granicznym Użytkowania (przemieszczenia w kierunku osi głównych profilu dla najbardziej niekorzystnych przypadków obciążenia). Jeżeli chcemy zapoznać się dokładniej z wynikami dla wybranego pręta, wystarczy wskazać go w tabeli kursorem myszy i kliknąć lewy klawisz. W rezultacie pojawi się okno:



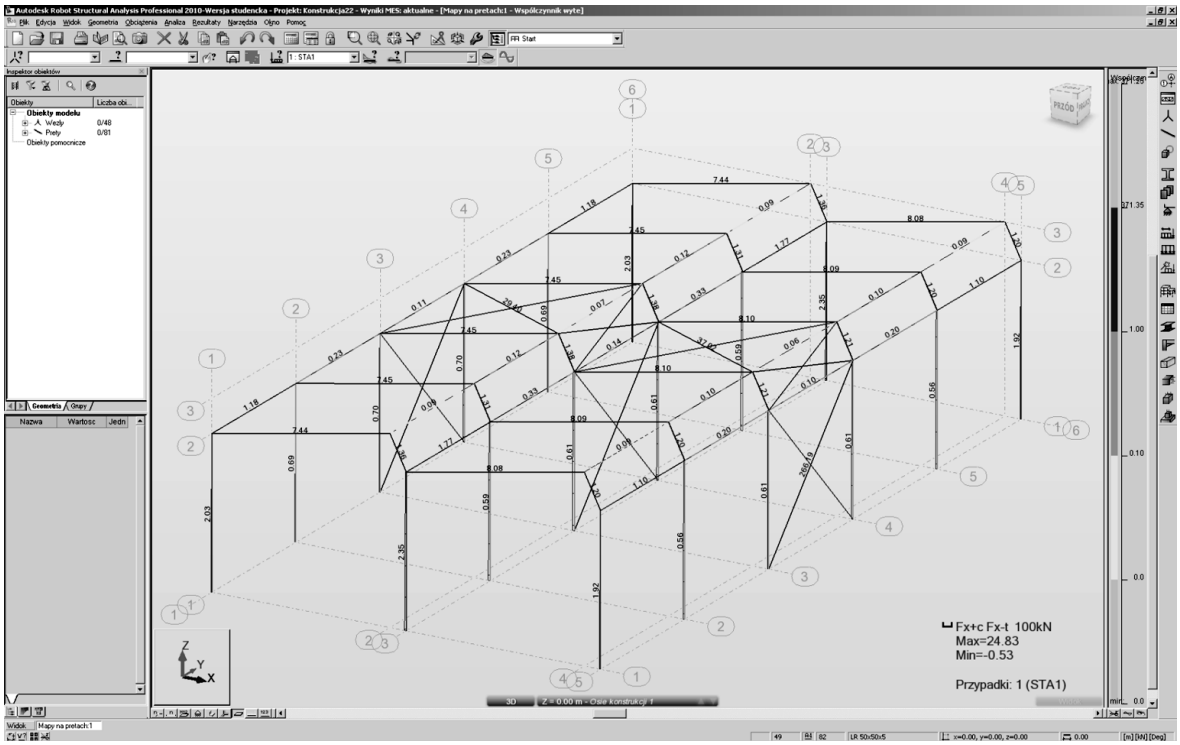
zawierające dokładny raport z obliczeń dla wskazanego obiektu w trzech zakładkach: *Wyniki uproszczone*, *Przemieszczenia*, *Wyniki szczegółowe* (strzałka).

Użycie przycisku *Analiza* prowadzi do otwarcia okna zawierającego histogram wytężenia poszczególnych prętów, przy czym – wpisując w okno tabeli umieszczonej pod wykresem wartości limitu górnego i dolnego – możemy zobaczyć na wykresie odpowiadające tym wartościom linie poziome, a w dalszych oknach tabeli listę prętów należących do tak zdefiniowanego przedziału i prętów spoza tego przedziału:



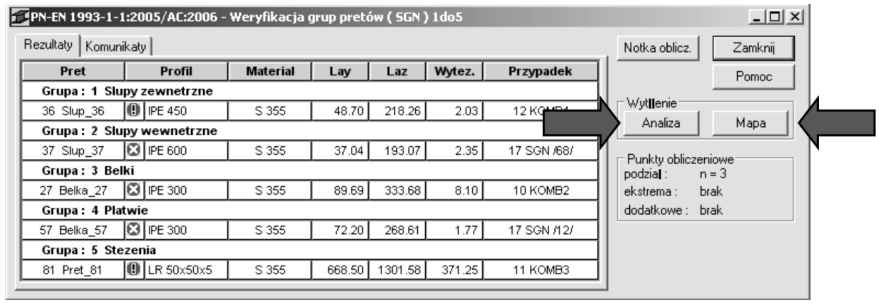
Użycie przycisku *Mapa* prowadzi do wyświetlenia mapy stanu wytężenia w poszczególnych prętach wraz z opisem i legendą. Kolorami oznaczono tu:

a) jasnoszary – elementy niedociążone (stopień wykorzystania nośności poniżej 10%),
b) ciemnoszary – elementy poprawne (stopień wykorzystania nośności pomiędzy 10% i 100%),
c) czarny – elementy przeciążone (stopień wykorzystania nośności powyżej 100%).



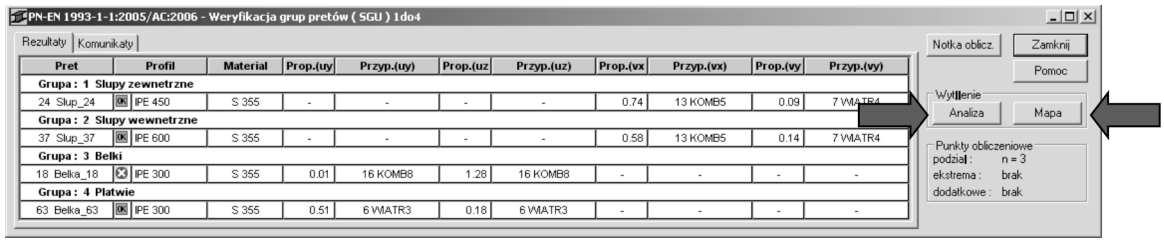
4. Rezultaty weryfikacji w grupach

Rezultatem weryfikacji w grupach jest pojawienie się następującego okna dialogowego w przypadku weryfikacji Stanu Granicznego Nośności:



Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przypadek
Grupa : 1 Slupy zewnetrzne						
36 Slup_36	IPE 450	S 355	48.70	218.26	2.03	12 KOMB4
Grupa : 2 Slupy wewnetrzne						
37 Slup_37	IPE 600	S 355	37.04	193.07	2.35	17 SGN /68/
Grupa : 3 Belki						
27 Belka_27	IPE 300	S 355	89.69	333.68	8.10	10 KOMB2
Grupa : 4 Platwie						
57 Belka_57	IPE 300	S 355	72.20	268.61	1.77	17 SGN /12/
Grupa : 5 Stezenia						
81 Pret_81	LR 50x50x5	S 355	668.50	1301.58	371.25	11 KOMB3

oraz poniższego okna w przypadku weryfikacji Stanu Granicznego Użytkowania:

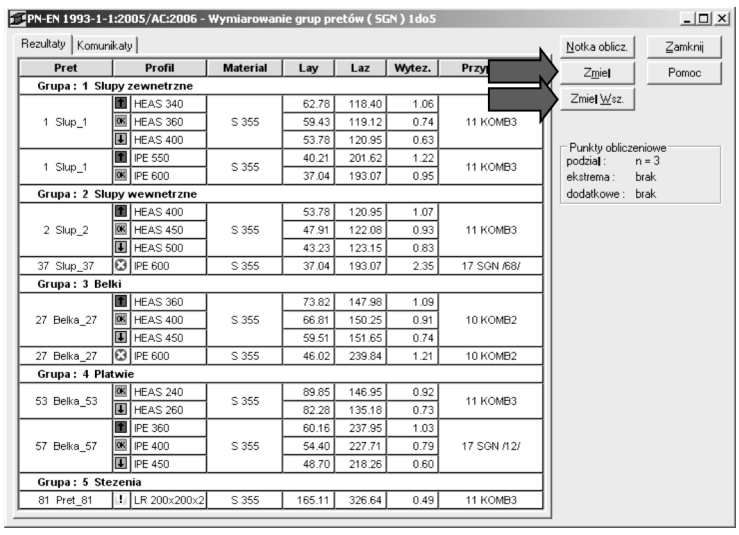


Pret	Profil	Material	Prop.(uy)	Przyp.(uy)	Prop.(uz	Przyp.(uz)	Prop.(vx	Przyp.(vx)	Prop.(vy	Przyp.(vy)
Grupa : 1 Slupy zewnetrzne										
24 Slup_24	IPE 450	S 355	-	-	-	-	0.74	13 KOMB5	0.09	7 VMATR4
Grupa : 2 Slupy wewnetrzne										
37 Slup_37	IPE 600	S 355	-	-	-	-	0.58	13 KOMB5	0.14	7 VMATR4
Grupa : 3 Belki										
18 Belka_18	IPE 300	S 355	0.01	16 KOMB8	1.28	16 KOMB8	-	-	-	-
Grupa : 4 Platwie										
63 Belka_63	IPE 300	S 355	0.51	6 VMATR3	0.18	6 VMATR3	-	-	-	-

Tak jak w przypadku weryfikacji prętów w kolejnych kolumnach powyższych tabel zawarto informacje o grupie, Stanie Granicznym Nośności (wytężenie dla najbardziej niekorzystnego przypadku obciążenia) lub Stanie Granicznym Użytkowania (przemieszczenia w kierunku osi głównych profilu dla najbardziej niekorzystnych przypadków obciążenia). Jeżeli chcemy zapoznać się dokładniej z wynikami dla wybranej grupy, wystarczy wskazać ją w tabeli kursorem myszy i kliknąć lewy klawisz. W rezultacie pojawi się stosowne okno, analogiczne do okna przedstawionego powyżej dla pręta. Opcje *Analiza* i *Mapa* działają tak samo jak w przypadku weryfikacji prętów.

5. Wymiarowanie w grupach

Rezultatem wymiarowania w grupach jest propozycja doboru prętów z puli dopuszczonej na etapie ***Definicje*** tak, aby spełnione zostały warunki odpowiedniego stanu granicznego (nośności bądź użytkowania). Dla każdej grupy, dla której program był w stanie dobrać poprawny profil pojawi się raport zawierający co najmniej trzy profile: największy niewystarczający, proponowany i najmniejszy nadmiarowy, tak jak to widać poniżej. Grupom 2 i 3 przyporządkowano cztery profile: największy w typoszeregu IPE (który okazał się niewystarczający) i po trzy w typoszeregu HEAS uszeregowane według powyższych reguł. Grupom 1 i 4 przyporządkowano aż pięć profili, gdyż tu okazało się możliwe dobranie profili spełniających warunki SGN zarówno w typoszeregu IPE, jak i HEAS. W grupie 5 poprawne dobranie profilu z typoszeregu kątowników równoramiennych okazało się niemożliwe.



Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przy
Grupa : 1 Slupy zewnetrzne						
1 Slup_1	HEAS 340	S 355	62.78	118.40	1.06	11 KOMB3
	HEAS 360		59.43	119.12	0.74	
	HEAS 400		53.78	120.95	0.63	
1 Slup_1	IPE 550	S 355	40.21	201.62	1.22	11 KOMB3
	IPE 600		37.04	193.07	0.95	
Grupa : 2 Slupy wewnetrzne						
2 Slup_2	HEAS 400	S 355	53.78	120.95	1.07	11 KOMB3
	HEAS 450		47.91	122.08	0.93	
	HEAS 500		43.23	123.15	0.83	
37 Slup_37	IPE 600	S 355	37.04	193.07	2.35	17 SGN /68/
Grupa : 3 Belki						
27 Belka_27	HEAS 360	S 355	73.82	147.98	1.09	10 KOMB2
	HEAS 400		66.81	150.25	0.91	
	HEAS 450		59.51	151.65	0.74	
27 Belka_27	IPE 600	S 355	46.02	239.84	1.21	10 KOMB2
Grupa : 4 Platwie						
53 Belka_53	HEAS 240	S 355	89.85	146.95	0.92	11 KOMB3
	HEAS 260		82.28	135.18	0.73	
57 Belka_57	IPE 360	S 355	60.16	237.95	1.03	17 SGN /12/
	IPE 400		54.40	227.71	0.79	
	IPE 450		48.70	218.26	0.60	
Grupa : 5 Stezenia						
81 Pret_81	LR 200x200x2	S 355	165.11	326.64	0.49	11 KOMB3

Po uzyskaniu satysfakcjonujących wyników można automatycznie podmienić aktualnie zastosowane w konstrukcji profile na profile proponowane (*Zmień* w przypadku jednej wybranej grupy, *Zmień Wsz.* w przypadku wszystkich grup), ale następnie należy bezwzględnie przeprowadzić całą procedurę analizy i weryfikacji od początku do końca ponownie.

UWAGA: Po zmianie profili operacje weryfikacji nie są wykonywane automatycznie.

Zapisujemy efekty dotychczasowej pracy w pliku *Konstrukcja2.rtd* (***Plik → Zapisz projekt jako...***).

Ćwiczenie 3
Rama 3D

Nowe polecenia: Wymiarowanie połączeń elementów stalowych, Wymiarowanie stopy, Obciążenia klimatyczne, Zrzuty ekranu, Dokumentacja projektu

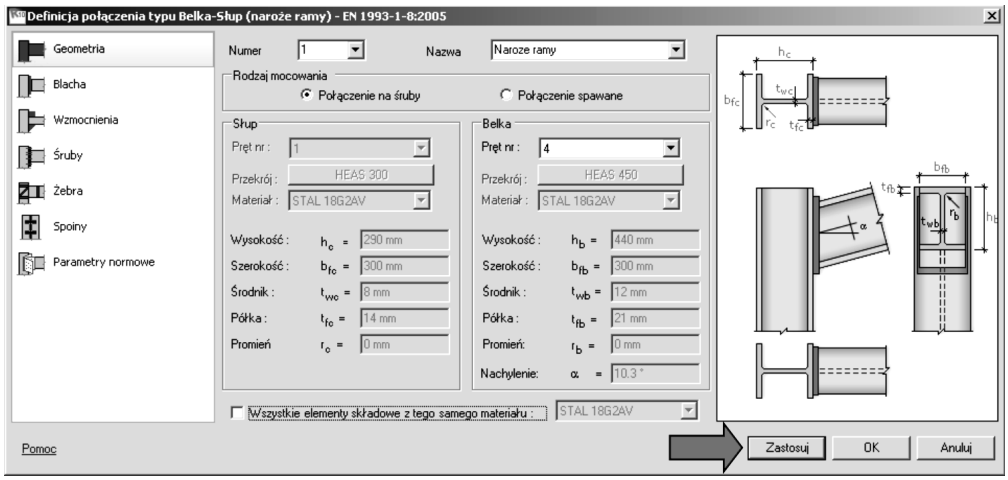
Wymiarowanie połączeń

1. Wczytanie ostatnio utworzonej konstrukcji

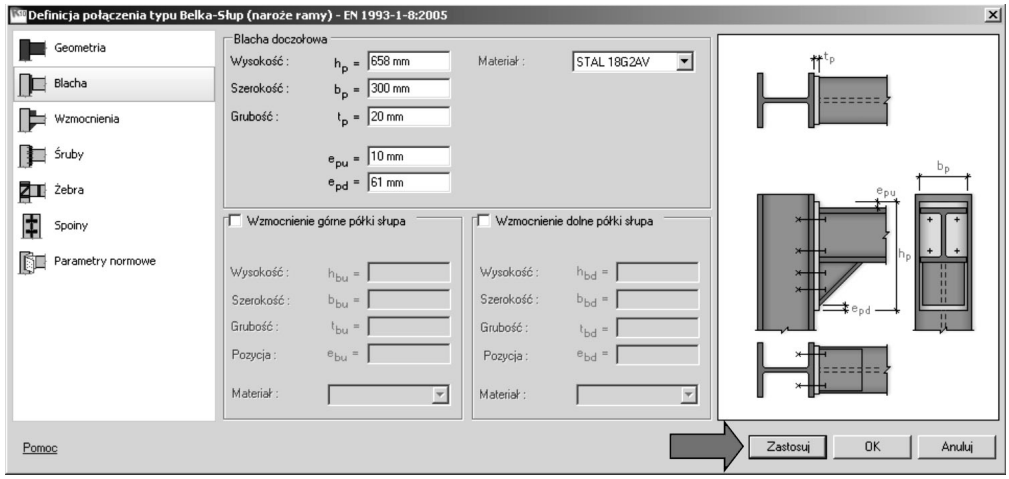
Otwieramy konstrukcję zapisaną na zakończenie Ćwiczenia 2 (*Konstrukcja2.rtd*) (***Plik → Otwórz projekt...***).

2. Wymiarowanie połączenia belka–słup

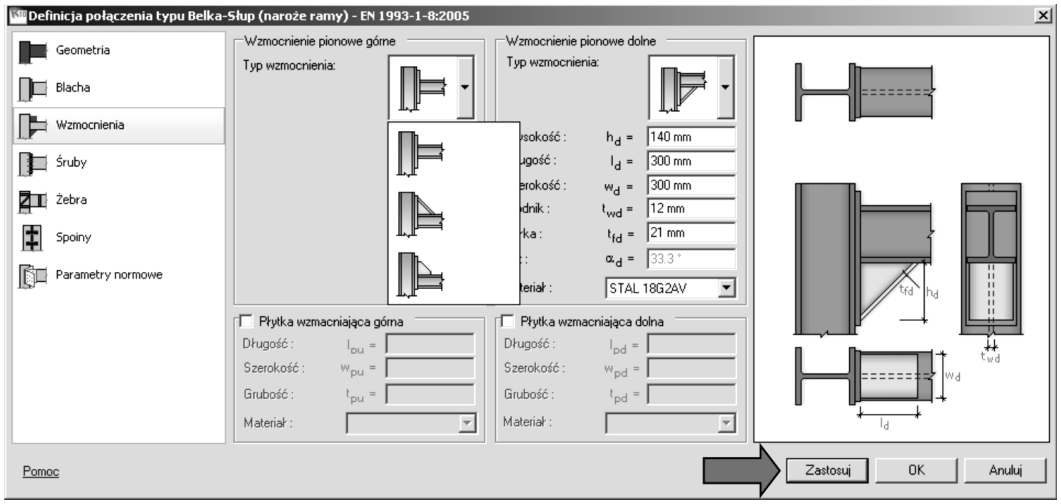
Uruchamiamy moduł wymiarowania połączeń konstrukcji stalowych (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie połączeń stalowych → Blok definicje/obliczenia...***). Wybieramy (oknem lub wskazując myszą) pręty, które mają zostać połączone wraz z węzłem, w którym ma zostać utworzone połączenie, zwracając uwagę na to, aby zaznaczyć jedynie łączone pręty leżące w jednej płaszczyźnie. Uruchamiamy wymiarowanie wskazanego połączenia (***Połączenia → Nowe połączenie dla wybranych prętów...***). W rezultacie otworzy się okno dialogowe, w którego kolejnych siedmiu (połączenie na śruby) lub czterech (połączenie spawane) zakładkach możemy zdefiniować wszystkie parametry geometryczne i materiałowe wykonywanego połączenia:
w zakładce pierwszej (*Geometria*) mamy możliwość wyboru typu połączenia (na śruby bądź spawane) oraz weryfikacji poprawności przekazania parametrów łączonych prętów z modułu definicji geometrii do modułu wymiarującego (profile łączonych elementów konstrukcji i materiał, z którego są wykonane):



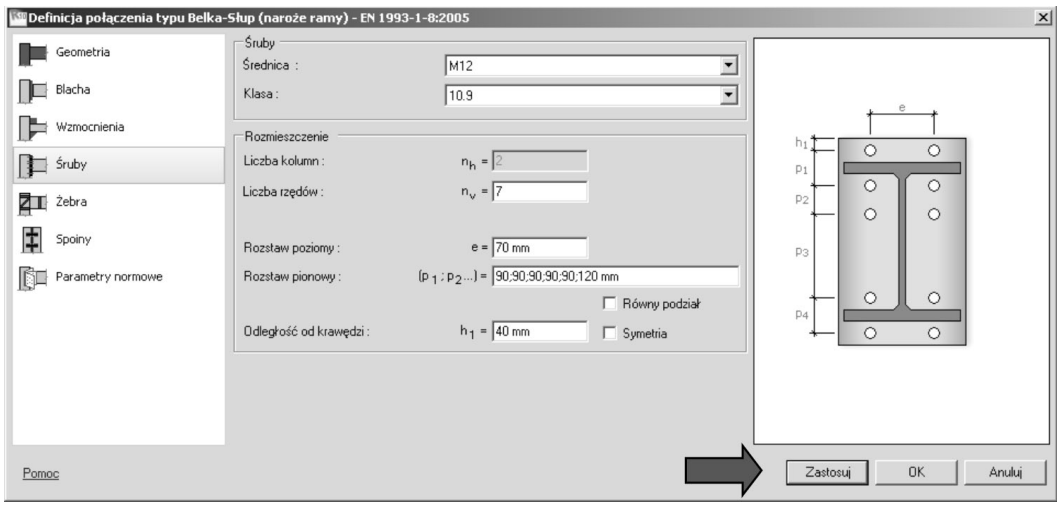
w zakładce drugiej (*Blacha*) ustalamy parametry blachy czołowej elementu dochodzącego (wymiary i materiał):



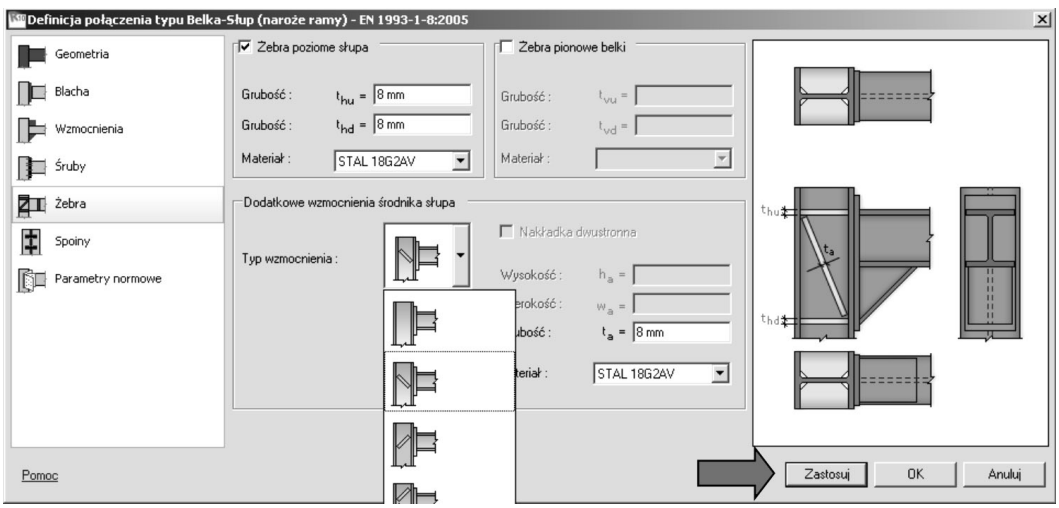
w zakładce trzeciej (*Wzmocnienia*) ustalamy, czy połączenie zostanie wzmocnione od góry lub dołu, wybieramy typ wzmocnienia i ustalamy jego parametry geometryczne oraz materiał:



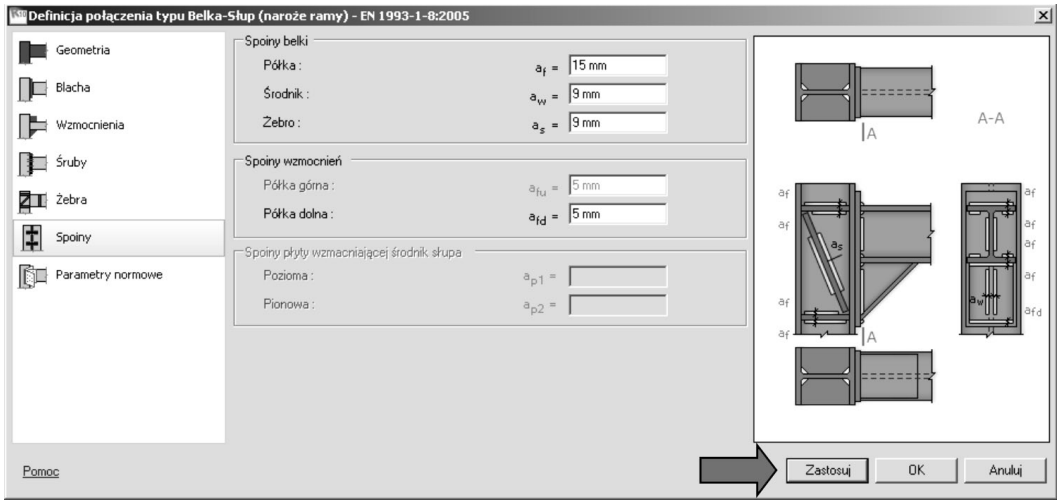
w zakładce czwartej (*Śruby*) ustalamy parametry połączenia na śruby, takie jak średnica i klasa śrub, liczba rzędów i kolumn oraz rozmieszczenie śrub w rzędach i kolumnach względem blachy węzłowej:



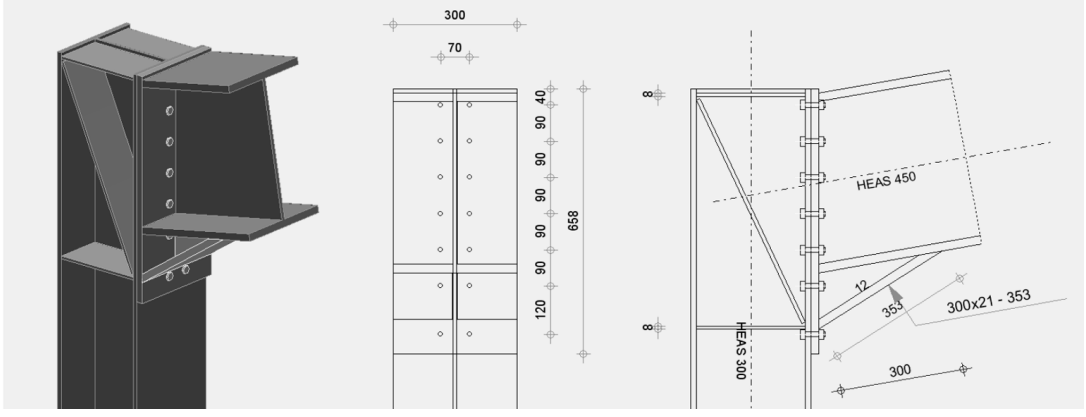
w zakładce piątej (*Żebra*) definiujemy parametry żeber poziomych i ewentualnych ukośnych wzmacniających środnik słupa w miejscach styku pasów belki z pasem słupa (grubość i materiał):



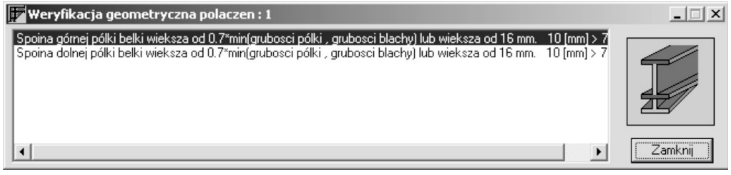
w zakładce szóstej (*Spoiny*) ustalamy parametry spoin łączących wzmocnienia z belką i słupem:



w ostatniej zakładce (*Parametry normowe*) określamy kategorię połączenia (A, B lub C) i podajemy parametry do obliczenia sztywności połączenia. Po ustaleniu wszystkich parametrów geometrycznych połączenia na zakładkach u dołu ekranu mamy możliwość podglądu jego geometrii w aksonometrii (*Widok połączenia*) lub rzutach (*Schemat*). W widoku aksonometrycznym dostępne są (prawy przycisk myszy) opcje edycji widoku (powiększenie, rotacja, translacja). Jeżeli natomiast chcemy zmienić wybrane parametry geometryczne połączenia (np. rozmiary blachy czołowej, wzmocnienia czy żeber), wystarczy na schemacie wskazać je kursorem myszy i kliknąć lewy klawisz, w wywołanym w ten sposób oknie dialogowym aktualizujemy wybrane wielkości.

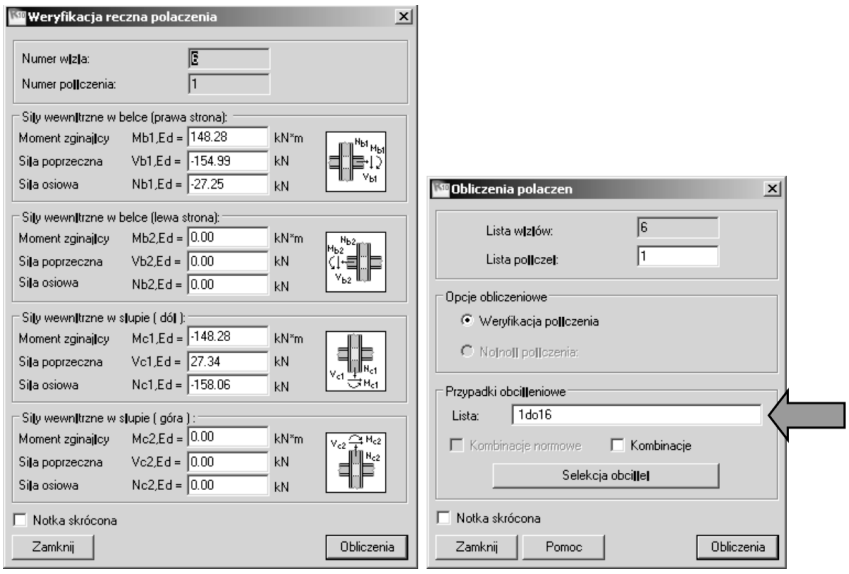


W trakcie definiowania parametrów geometrycznych połączenia wygodnie jest mieć otwarte okno weryfikacji geometrycznej (***Połączenia → Weryfikacja geometryczna...***). W przypadku wystąpienia problemów z geometrią połączenia (niewłaściwe proporcje grubości elementów łączonych, złe grubości spoin pachwinowych) w oknie tym pojawią się stosowne komunikaty:



UWAGA: Po zmianie profili geometria połączenia jest modyfikowana, ale może wymagać ręcznej korekty, natomiast operacje weryfikacji nie są wykonywane automatycznie; stan okna weryfikacji geometrycznej połączenia jest aktualizowany wyłącznie po wciśnięciu przycisku *Zastosuj* lub *OK* (strzałka).

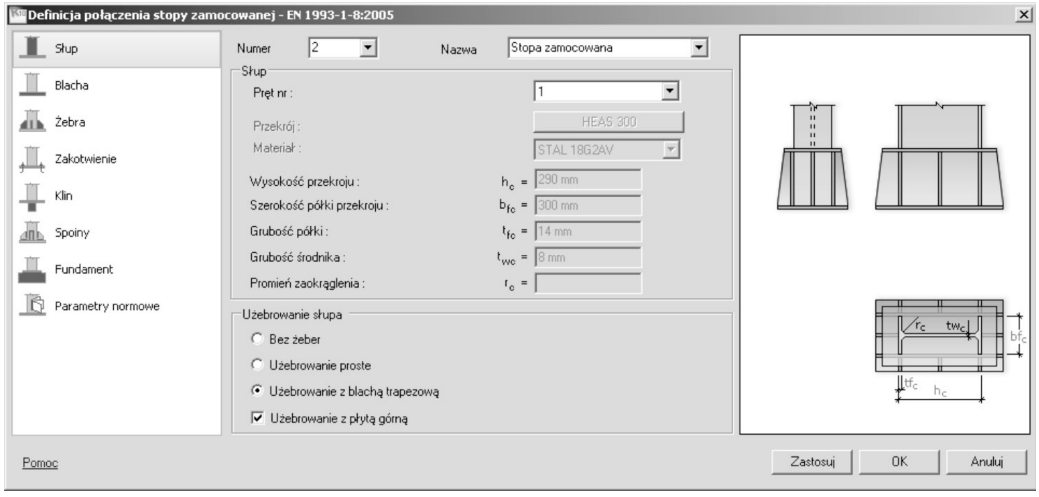
Po zdefiniowaniu połączenia możemy przeprowadzić jego weryfikację ręczną (***Połączenia → Obliczenia ręczne...***) lub automatyczną (***Połączenia → Obliczenia...***). W przypadku pierwszym w oknie dialogowym *Weryfikacja ręczna połączenia* podajemy wielkości sił przekrojowych, które mają być przeniesione przez połączenie, a następnie dokonujemy obliczeń, natomiast w przypadku drugim wielkości sił przekrojowych, dla których ma być zweryfikowane połączenie są pobierane automatycznie z modułu obliczającego MES (*Obliczenia połączeń*) na podstawie naszej decyzji dotyczącej przypadków obciążeniowych, które mają być wzięte pod uwagę (strzałka):



W każdym przypadku po wykonaniu obliczeń generowany jest raport, który możemy zapisać na dysku lub wydrukować. W przypadku zmiany profili prętów schodzących się w węźle, możemy dokonać automatycznej aktualizacji profili (***Połączenia → Aktualizacja połączeń***), ale weryfikację geometrii i nośności połączenia bezwzględnie należy powtórzyć.

3. Wymiarowanie połączenia stopy zamocowanej

W podobny sposób prowadzimy obliczenia dla innych typów połączeń, np. słupa z fundamentem:



w kolejnych ośmiu zakładkach, mając możliwość weryfikacji poprawności przekazania parametrów podpory z modułu definicji geometrii do modułu wymiarującego (profil elementu konstrukcji i materiał, z którego jest wykonany) (*Słup*), ustalenia gabarytów blachy stopy (*Blacha*), rozmiarów żeber (*Żebra*), śrub kotwiących (*Zakotwienie*), klina łączącego stopę z fundamentem (*Klin*), spoin pomiędzy kształtownikiem słupa i elementami stopy (*Spoiny*), betonu fundamentu (*Fundament*) i parametrów normowych, takich jak rodzaj obróbki końca słupa i rodzaj pracy (*Parametry normowe*).

4. Kopiowanie połączenia na inne węzły

Jeżeli w konstrukcji występuje większa liczba węzłów, w których chcemy zastosować połączenia o identycznych atrybutach geometrycznych, możemy po jednorazowym ustaleniu ich parametrów dokonać kopiowania. W tym celu w oknie inspektora połączeń stalowych (***Okno → Okno inspektora***) wskazujemy połączenie, które ma być skopiowane, a następnie po zaznaczeniu na schemacie konstrukcji stosownej grupy prętów oraz węzła, w którym się stykają kopiujemy atrybuty połączenia (***Połączenia → Kopiowanie połączenia dla wybranych prętów...***). Możliwe jest kopiowanie atrybutów na kilka węzłów jednocześnie.

UWAGA: W każdym przypadku po skopiowaniu atrybutów należy zweryfikować nośność nowo utworzonego połączenia ręcznie (***Połączenia → Obliczenia ręczne...***) lub automatycznie (***Połączenia → Obliczenia...***).
W programie możliwe jest obliczanie wybranych typów połączeń stalowych, takich jak: stopa przegubowa, zamocowana lub zabetonowana, połączenie doczołowe, połączenia w narożu ramy, słup–belka, połączenia na kątowniki (za środnik) belki z belką i belki ze słupem oraz niektórych połączeń prętów w kratownicy.
Rezultatem obliczeń dla każdego połączenia jest *Notka obliczeniowa*, którą należy dołączyć do dokumentacji projektu.

Obciążenia klimatyczne

1. Wczytanie poprzednio utworzonej konstrukcji

Ponieważ operacja działa wyłącznie dla geometrii 2D, powracamy do ramy płaskiej zdefiniowanej w ćwiczeniu pierwszym i zapisanej jako plik *Konstrukcja1.rtd* (***Plik → Otwórz...***). Usuwamy obciążenia wiatrem i śniegiem. Najprościej jest wykonać tę operację w oknie *Przypadki obciążeń* (***Obciążenia → Przypadki...***), wskazując myszą numer przypadku, który chcemy usunąć (***WIATR1***, ***WIATR2***, ***SN1***), a następnie wciskając przycisk *Usuń*. Wraz z przypadkiem obciążeń zostaną usunięte wszystkie obciążenia z nim skojarzone, co można zweryfikować w tabeli obciążeń (***Obciążenia → Tabela obciążeń***).

2. Uzupełnienie ściany szczytowej

W każdym polu ściany szczytowej wprowadzamy dwa słupki wykonane z kształtownika IPE300 w odstępie czterech metrów, utwierdzone w fundamencie i połączone przegubowo (***Geometria → Zwolnienia...***) z belką ramy jako dodatkowe podparcie dla obudowy hali. W oknie dialogowym *Zwolnienie* wybieramy typ zwolnienia *Przegub-Utwierdzenie* i myszą wskazujemy kolejne pręty, zwracając uwagę na to, aby wskazywać pręt w pobliżu końca podpartego przegubowo:

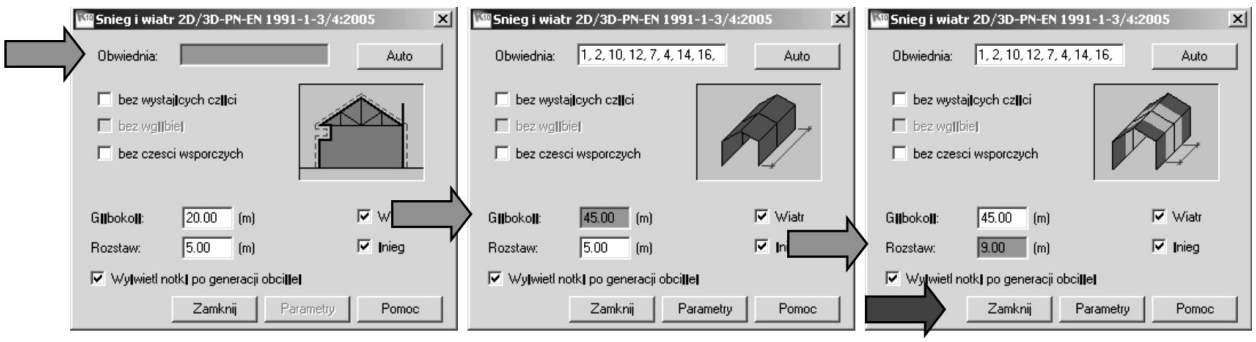
Gdyby w oknie *Zwolnienie* nie było odpowiedniego typu zwolnienia, należy je utworzyć, klikając na ikonę z kartką papieru (strzałka). Kształtowniki winny być obrócone o 90 stopni wokół swojej osi podłużnej (kąt gamma równy 90 stopni).

UWAGA: Sposób wskazywania pręta ma wpływ na to, na którym jego końcu pojawi się zwolnienie; jeżeli numery prętów wprowadzamy w oknie *Aktualna selekcja* zwolnienie pojawi się na tym końcu, w którym zaczepiony jest **lokalny** układ współrzędnych pręta, natomiast gdy pręty wskazujemy myszą, zwolnienie pojawi się na końcu bliższym kursora myszy w chwili wskazania.

3. Obwiednia konstrukcji i parametry 3D konstrukcji

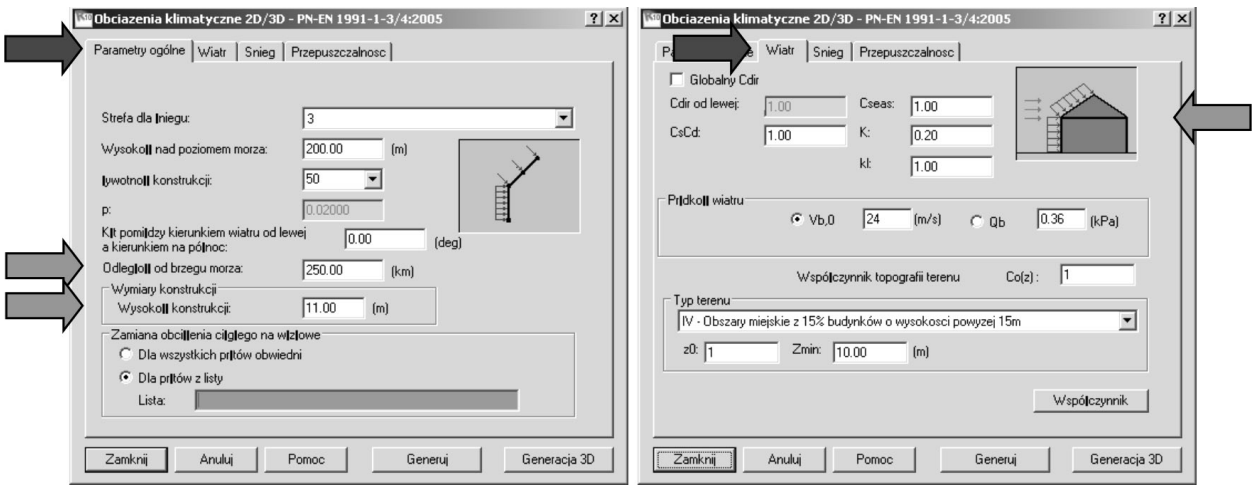
Po wprowadzeniu geometrii dla ramy **szczytowej** (rama powtarzalna uzupełniona o elementy występujące tylko w szczytach hali, takie jak np. dodatkowe słupki pośrednie, stężenia, ...) uruchamiamy moduł definiowania obciążeń klimatycznych (***Obciążenia → Obciążenia specjalne → Wiatr i śnieg 2D/3D***).

W oknie dialogowym wprowadzamy kolejno listę węzłów stanowiących zewnętrzną obwiednię konstrukcji w sekwencji (ręcznie lub automatycznie – przyciskiem *Auto*, przy czym poprawność automatycznej generacji obwiedni należy zweryfikować). W dalszej kolejności podajemy informację o długości hali (**45** m), rozstawie ram nośnych (**9** m), obciążeniach klimatycznych, dla których mają być prowadzone obliczenia i wciskamy przycisk *Parametry* (strzałka).

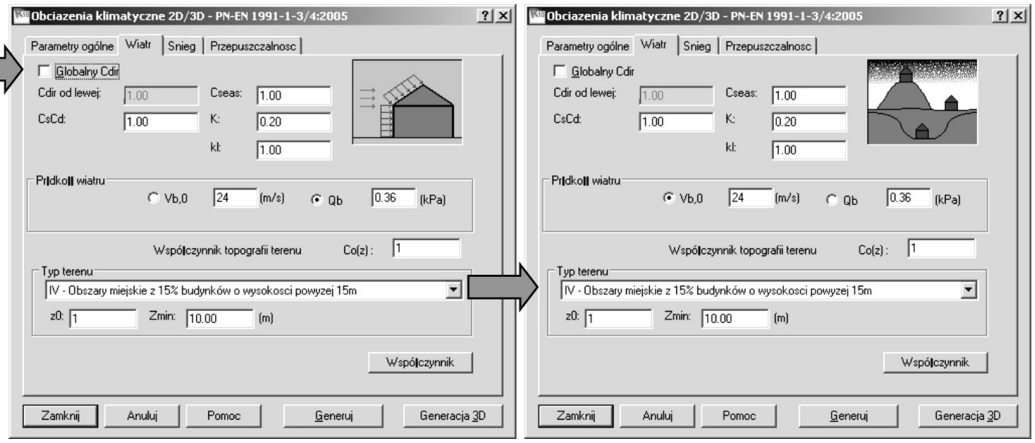


4. Parametry generacji obciążeń klimatycznych

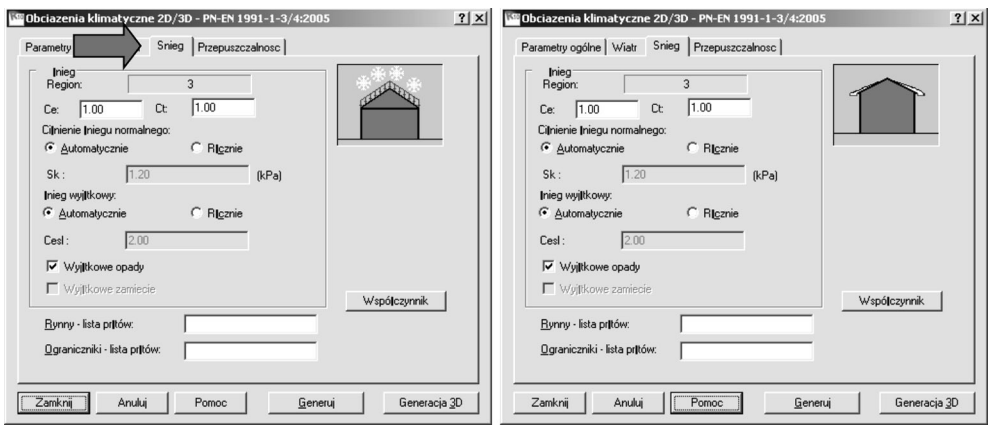
W zakładce *Ogólne* ustalamy parametry ogólne generacji obciążeń klimatycznych według normy, takie jak: wysokość całkowita konstrukcji (**11** m), odległość od brzegu morza (**250** km) (strzałka), kąt pomiędzy kierunkiem od lewej a północą i wysokość nad poziomem morza (**200** m) oraz żywotność (czas eksploatacji) konstrukcji i strefę dla obciążenia śniegiem.



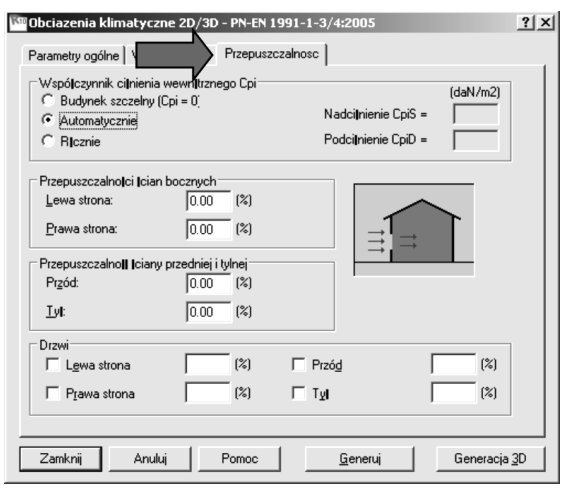
W zakładce *Wiatr* ustalamy dalsze normowe parametry generacji obciążenia wiatrem, takie jak globalny współczynnik ciśnienia wiatru, współczynnik sezonowy, współczynnik wysokości nad poziom morza i parametr kształtu. W dolnej części okna określamy typ terenu (brzeg morza, jeziora, obszary upraw, obszary przemysłowe i podmiejskie, obszary zabudowy miejskiej) i związane z nim współczynniki.



W zakładce *Śnieg* ustalamy normowe parametry generacji obciążenia śniegiem, takie jak: ciśnienie śniegu normalnego, sposób wyznaczania ciśnienia śniegu wyjątkowego, możliwość występowania opadów wyjątkowych, możliwość tworzenia się na dachu worków śnieżnych na rynnach lub płotkach ograniczających zsuwanie się śniegu z dachu.



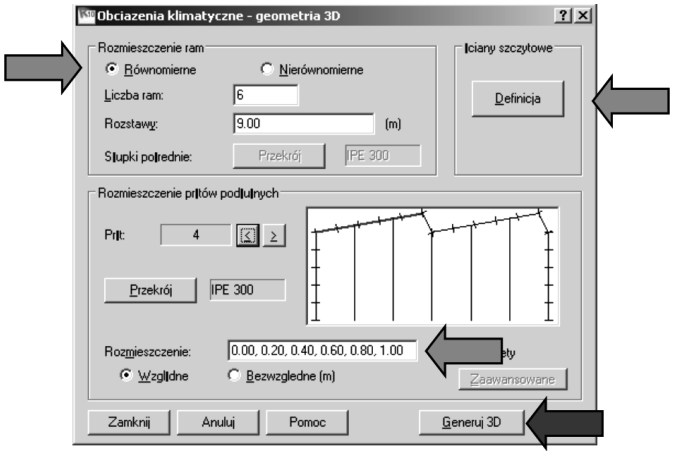
W zakładce *Przepuszczalność* określamy, czy ściany czołowe i boczne budowli są przenikliwe dla wiatru (w procentach) oraz, ewentualnie, jaki procent powierzchni odpowiedniej ściany stanowi powierzchnia drzwi.



UWAGA: Dla elementów konstrukcji znajdujących się poniżej poziomu posadowienia nie są generowane obciążenia wiatrem.

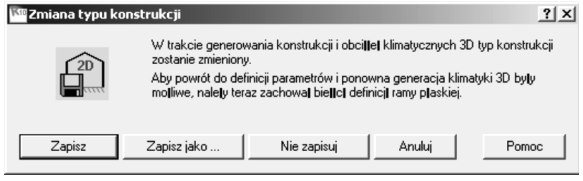
5. Automatyczna generacja konstrukcji 3D

Operację wyznaczenia obciążeń klimatycznych działających na naszą konstrukcję uruchamiamy przyciskiem *Generacja 3D*, co powoduje pojawienie się okna dialogowego *Obciążenia klimatyczne – geometria 3D*, w którym możemy zmodyfikować niektóre podane uprzednio parametry generacji układu przestrzennego, takie jak *Liczba ram* i ich *Rozstawy*, dodatkowo mamy możliwość określenia położeń prętów podłużnych (płatwi) łączących poszczególne ramy. Położenia płatwi oraz rodzaj kształtownika, z jakiego są wykonane określamy dla każdego elementu konstrukcyjnego ramy, na którym oparte są płatwie osobno. Położenia płatwi możemy podać we współrzędnych względnych lub absolutnych w poniższym oknie dialogowym.



Po wciśnięciu przycisku *Definicja* w oknie dialogowym *Obciążenia klimatyczne – ściany szczytowe* możemy określić listę prętów ramy poprzecznej, które występują wyłącznie w ścianach szczytowych (nie będą powielane przy tworzeniu ram pośrednich w konstrukcji), ponadto w tym oknie należy zdefiniować, które pręty (**wyłącznie pionowe**) ścian szczytowych będą obciążane ciśnieniem wiatru.

Przycisk *Generuj 3D* uruchamia tworzenie konstrukcji przestrzennej i procedury obliczeniowe generacji obciążeń klimatycznych. Ponieważ operacja ta nie może być cofnięta, przed przystąpieniem do niej na ekranie pojawia się poniższe ostrzeżenie i mamy możliwość zapisania konstrukcji 2D do pliku, z której należy skorzystać.



Utworzona konstrukcja 3D jest automatycznie zapisywana w pliku o poprzedniej nazwie z przyrostkiem 3D (w naszym przypadku będzie to *Konstrukcja1_3D.rtd*). Na zakończenie obliczeń jest tworzona *Notka obliczeniowa*, którą należy dołączyć do dokumentacji. Dalsze etapy obliczeń przebiegają jak poprzednio, czyli generacja kombinacji, obliczenia i wymiarowanie.

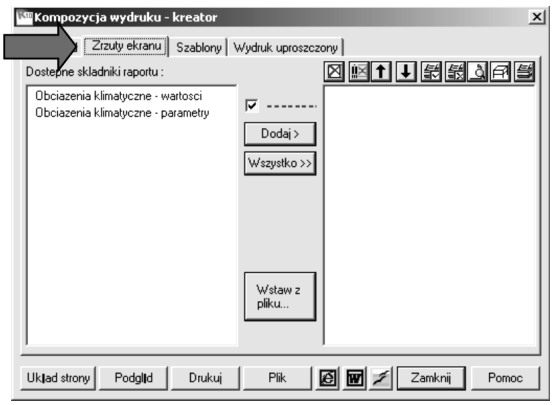
Dokumentacja projektu

1. Zrzuty ekranu

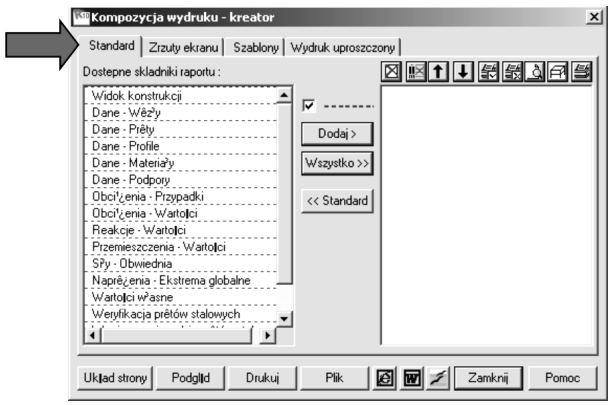
Opracowanie dokumentacji w programie jest bardzo proste dzięki systemowi zrzutów ekranu. W każdym momencie, uruchamiając odpowiednie polecenie (***Plik → Zrzuć ekran...***), możemy zapisać bieżący stan ekranu w pamięci oraz nadać mu jednoznaczną nazwę.

2. Kompozycja wydruku

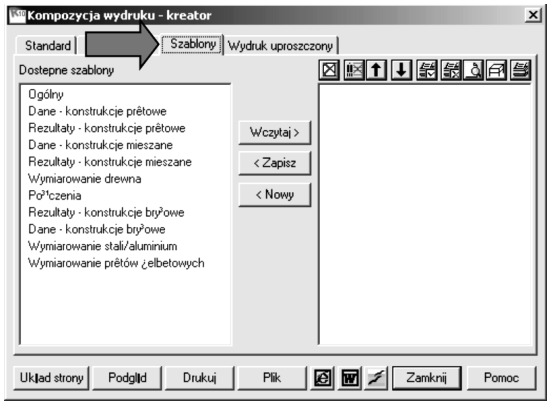
Na etapie opracowywania dokumentacji obliczeń możemy każdy zrzut ekranu włączyć do niej w pożądanym miejscu, wywołując stosowne polecenie (***Plik → Kompozycja wydruku...***) i wybierając zakładkę *Zrzuty ekranu*. Zrzuty dodaje się do dokumentacji, przenosząc je z lewego panelu do prawego za pomocą przycisku *Dodaj >*. Przerywana czerwona linia pomiędzy poszczególnymi zrzutami oznacza przejście do nowej strony.



Możemy również skorzystać z gotowych komponentów wydruku za pomocą tego samego polecenia (***Plik → Kompozycja wydruku...***), stosując gotowe, predefiniowane zrzuty ekranu znajdujące się w zakładce *Standard*:

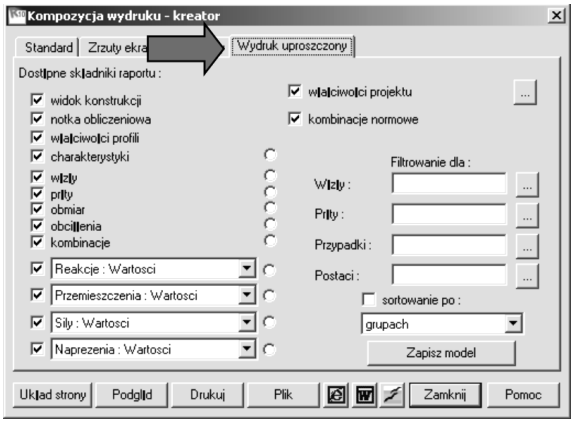


lub gotowe szablony wydruku opracowane dla pewnych, najpopularniejszych typów konstrukcji (zakładka *Szablony*):



Jeżeli korzystamy z komponentów predefiniowanych lub szablonów wydruku, możemy do nich dołączyć na tych samych zasadach zrzuty ekranu utworzone przez nas.

W najprostszym przypadku możemy skorzystać z wydruku uproszczonego:



a każdy z utworzonych dokumentów możemy zapisać w formacie **.rtf** lub **.doc**.

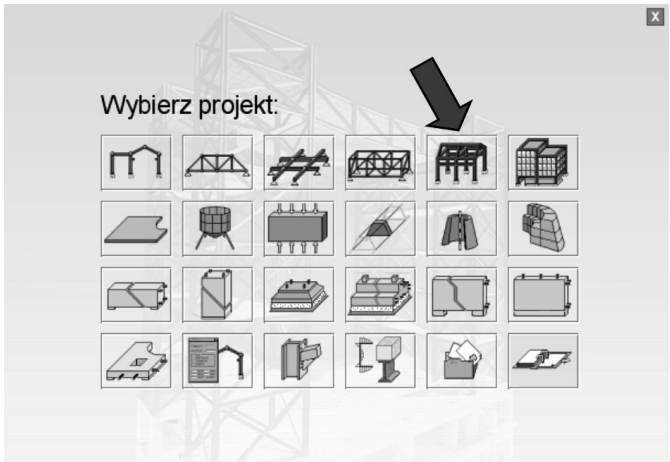
UWAGA: Jeżeli w trakcie pracy wprowadzimy do projektu zmiany po zapamiętaniu zrzutów ekranu, zrzuty będą automatycznie aktualizowane aż do chwili ostatecznego wygenerowania dokumentacji.

Ćwiczenie 4
Rama 3D

Nowe polecenia: Zaawansowane charakterystyki prętów, Analiza nieliniowa

1. Konfiguracja programu

Wybieramy typ zadania – projektowanie ramy przestrzennej:

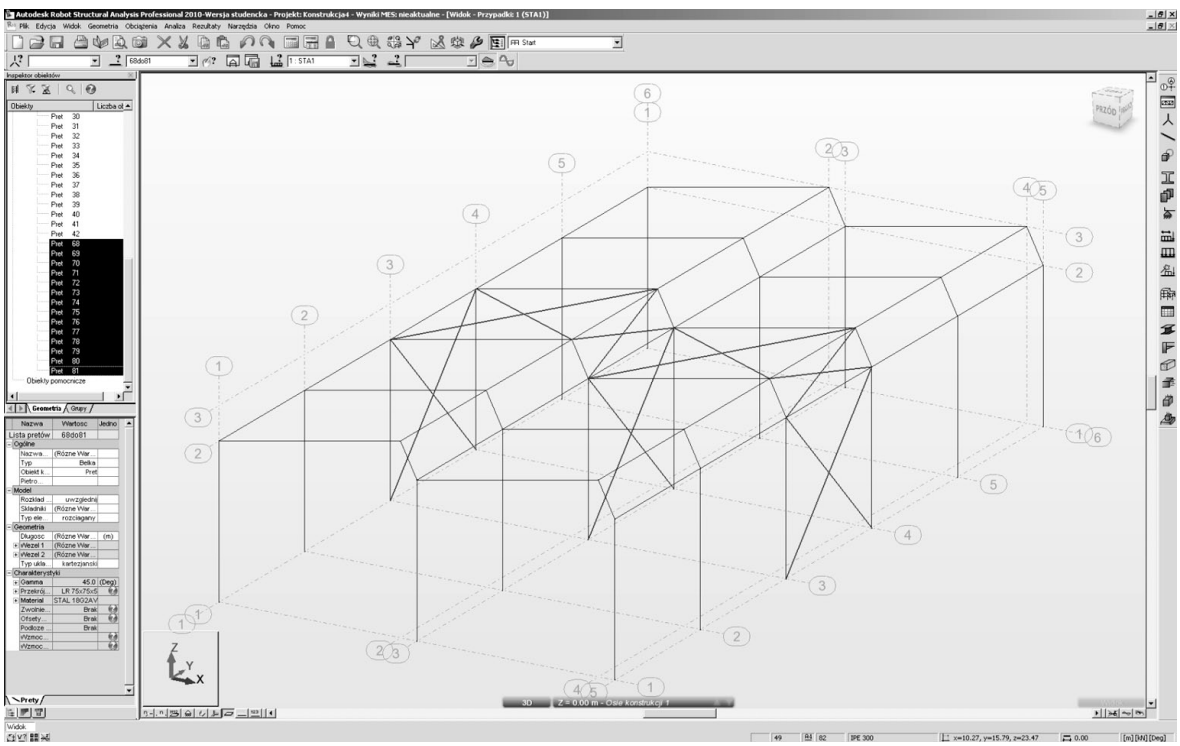


2. Wczytanie ostatnio utworzonej konstrukcji

Otwieramy projekt opracowany w ćwiczeniu 2 (*Konstrukcja2.rtd*) (***Plik → Otwórz projekt...***).

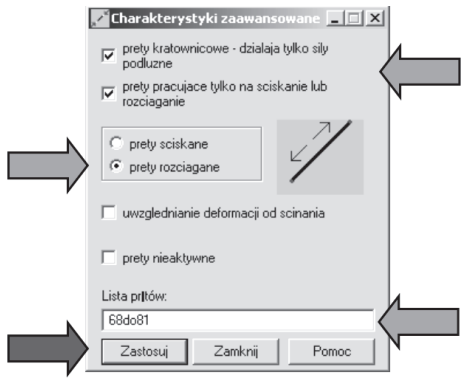
3. Modyfikacja własności prętów

Zaznaczamy wszystkie pręty stężeń (o numerach od 68 do 81 – na rysunku zaznaczone kolorem ciemnoszarym):

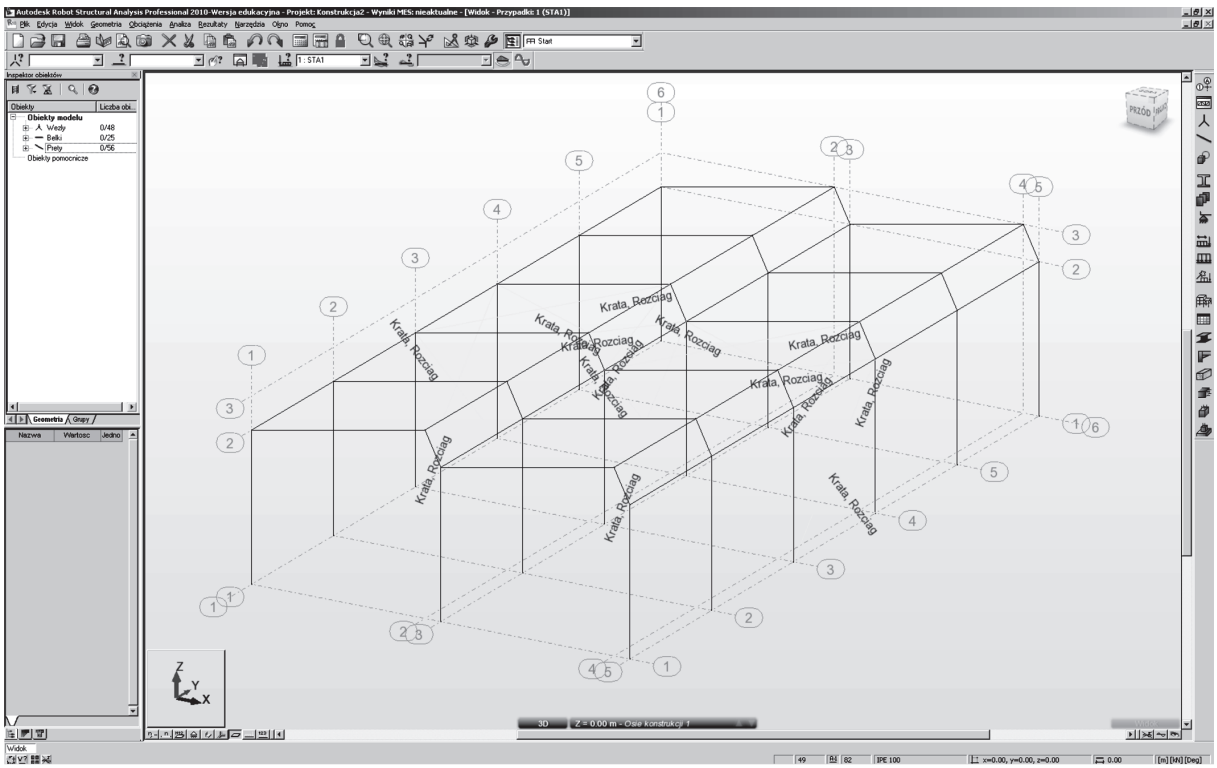


UWAGA: Numeracja zależy od przyjętej kolejności generacji prętów konstrukcji.

Ustalamy parametry prętów – praca tylko na rozciąganie (***Geometria → Cechy dodatkowe → Charakterystyki zaawansowane prętów...***), w oknie dialogowym, które się pojawi włączamy opcje: pręty kratownicowe, pręty pracujące tylko na rozciąganie:



Pręty możemy wskazać myszą (kolejno lub oknem – przecinającym bądź zawierającym) lub wpisać na listę (strzałka), używając słów kluczowych *do*, *krok* i *wszystkie*. Na zakończenie akceptujemy wybór przyciskiem *Zastosuj*. Po wykonaniu polecenia na wskazanych prętach powinien pojawić się stosowny opis:

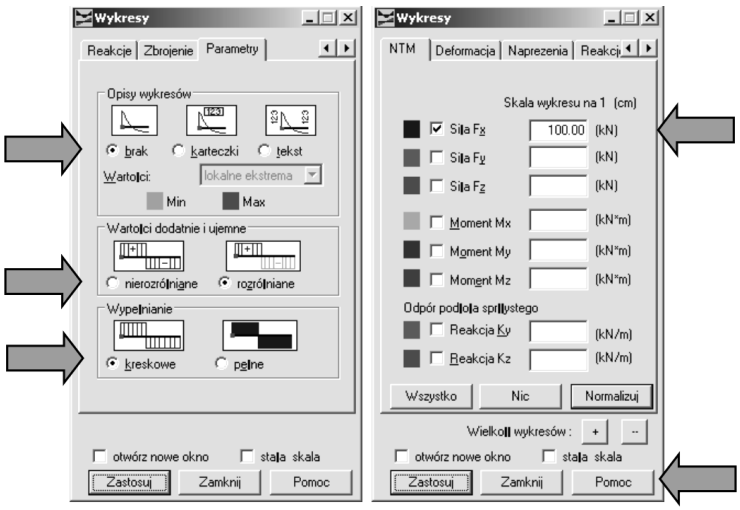


4. Analiza konstrukcji

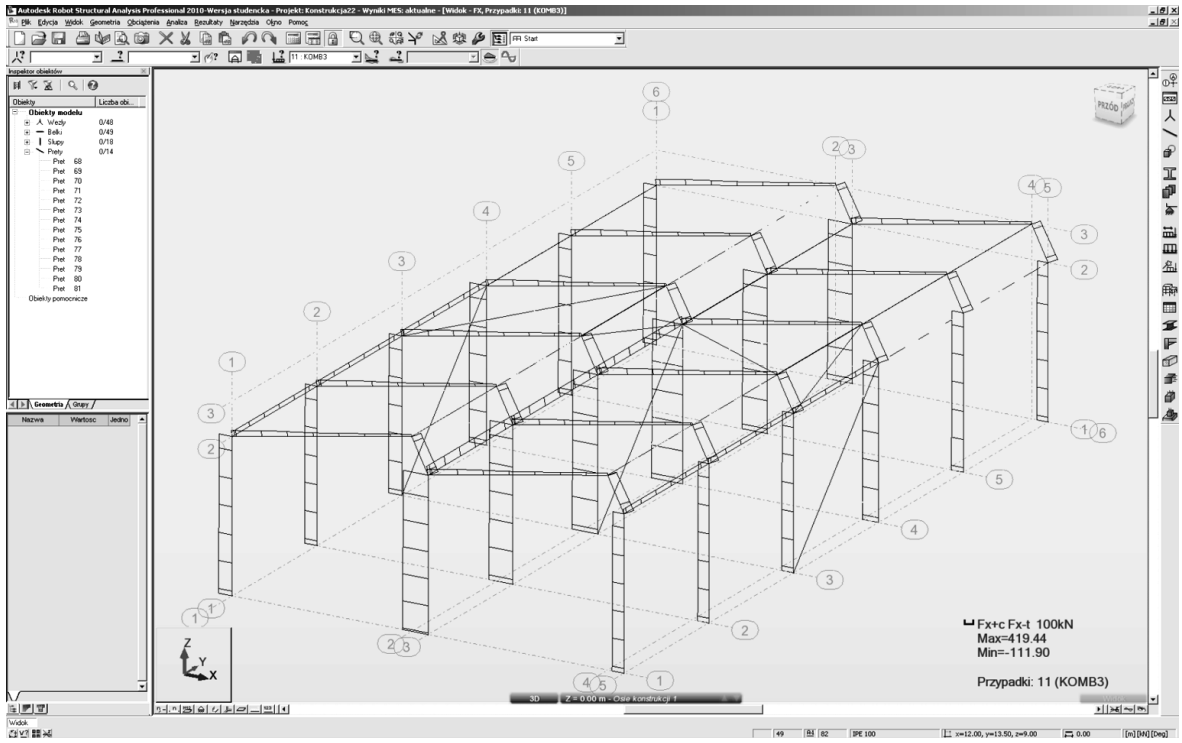
Uruchamiamy obliczenia (***Analiza → Obliczenia***).

5. Prezentacja wyników

Po wykonaniu obliczeń przechodzimy do modułu prezentacji wyników (***Rezultaty → Wykresy na prętach...***), w oknie dialogowym *Wykresy* w zakładce *Parametry* ustawiamy parametry prezentacji: wykresy bez opisu, wartości dodatnie i ujemne rozróżnialne, wypełnienie kreskowe, a w zakładce *NTM* prezentację siły F_x i *Normalizuj* oraz zatwierdzamy wybór przyciskiem *Zastosuj*:

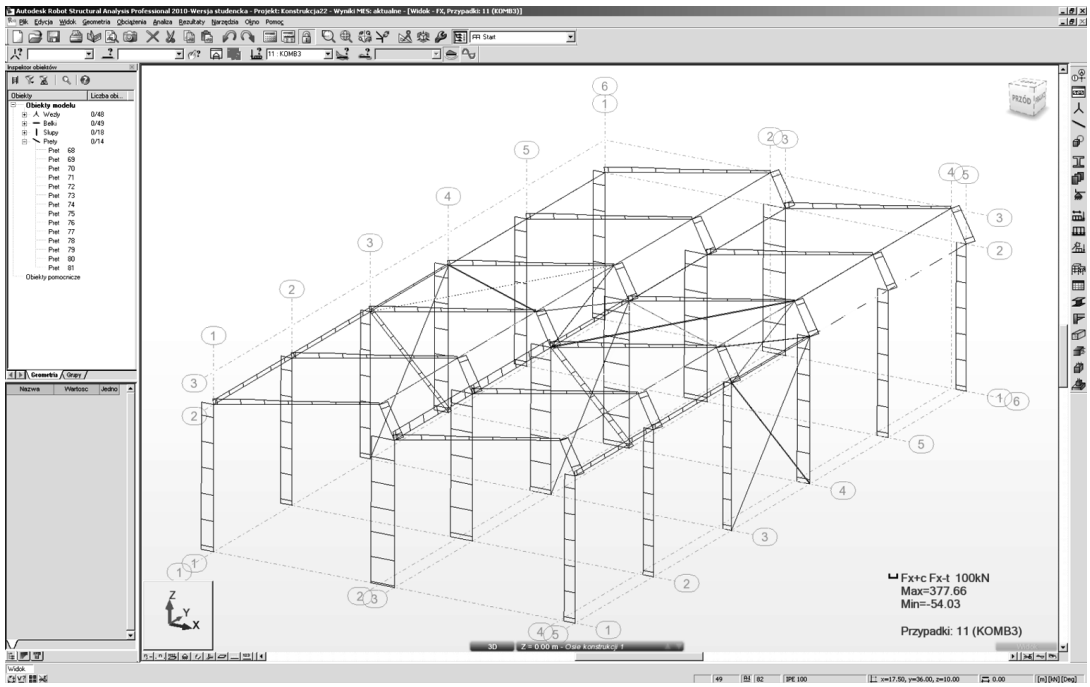


Wykres siły podłużnej w prętach dla kombinacji ***KOMB3*** (Stan Graniczny Nośności) powinien wyglądać jak na poniższym rysunku:



UWAGA: W przypadku analizy nieliniowej niemożliwe jest korzystanie z opcji automatycznego generowania kombinacji (***Obciążenia → Kombinacje automatyczne...***)

Poniżej dla porównania przedstawiono wynik obliczeń dla tego samego zadania, przy identycznych obciążeniach, ale z możliwością belkowej pracy zaznaczonych prętów.



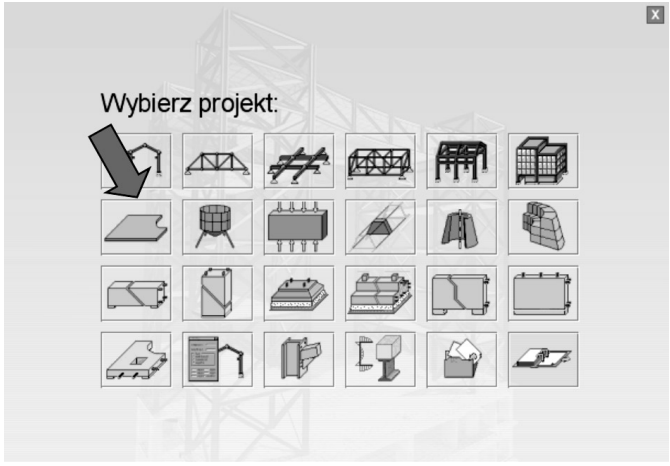
Jak widać bardziej realistyczny model pracy konstrukcji (wyboczenie stężeń ściskanych) prowadzi do większych wartości sił osiowych w prętach.

Ćwiczenie 5
Płyta żelbetowa 2D

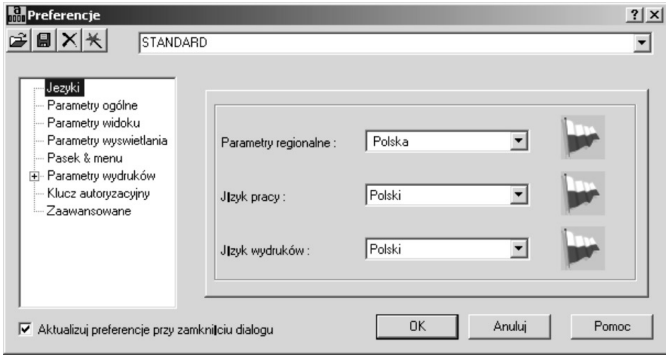
Nowe polecenia: Definicja geometrii konstrukcji, Polilinia, Panel, Lustro, Nowy materiał, Grubość ES, Parametry zbrojenia, Podpory liniowe, Generacja siatki MES (parametry, emitery, zagęszczanie), Prezentacja wyników

1. Konfiguracja programu

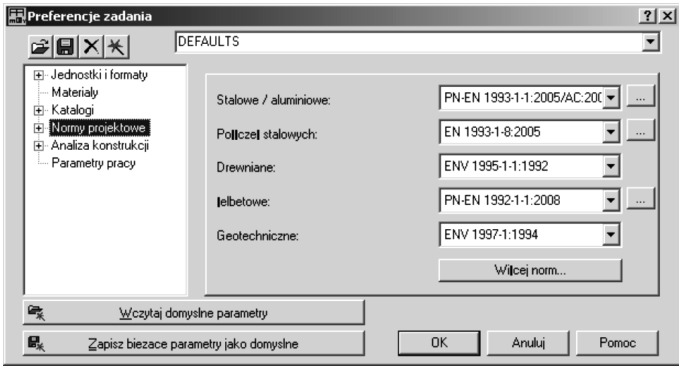
Wybieramy typ zadania – projektowanie płyty żelbetowej



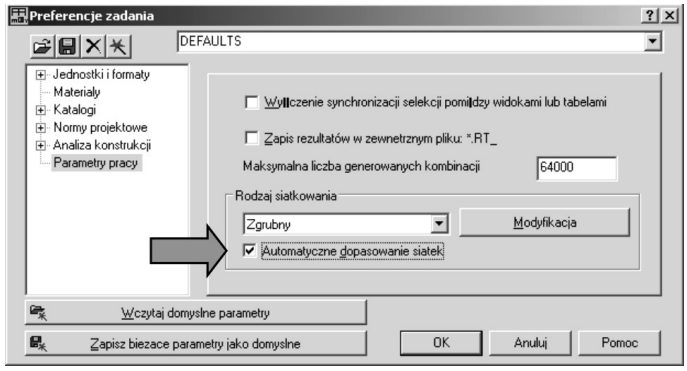
weryfikujemy ustawienia regionalne (***Narzędzia → Preferencje***):



ustalamy parametry projektu (***Narzędzia → Preferencje zadania***), sprawdzając czy w grupie *Normy projektowe* zostały ustawione aktualnie obowiązujące w Polsce normy:



ponadto w grupie *Parametry pracy* włączamy opcję *Automatyczne dopasowanie siatek*:



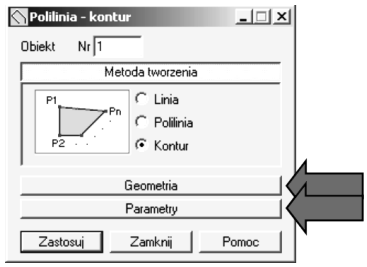
2. Osie konstrukcji

Osie konstrukcji (***Geometria → Osie konstrukcji...***) wprowadzamy następująco:

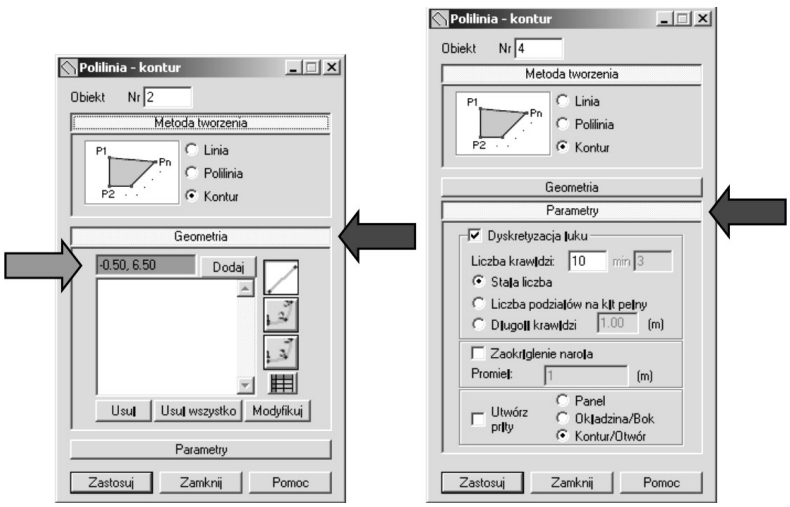
– w kierunku ***X*** : 0,00, 3,00, 6,00, 9,00 m;
– w kierunku ***Y*** : 0,00, 3,00, 6,00 m.

3. Geometria płyty

Wprowadzamy zarys konturu płyty (***Geometria → Obiekty → Polilinia – kontur...***). Ponieważ części płyty będą się skokowo różnić grubością, dzielimy ją na fragmenty tak, aby w każdym fragmencie grubość była stała. Kontur zewnętrzny każdego fragmentu tworzy odrębną polilinię. Jednak możemy podzielić płytę na więcej części, aby lepiej panować nad generacją siatki. W celu wprowadzenia konturu w oknie dialogowym *Polilinia – kontur*:



pozostawiamy metodę tworzenia *Kontur* i naciskamy przycisk *Geometria*. W dolnej (otwartej po przyciśnięciu przycisku *Geometria*) części okna możemy teraz podać współrzędne kolejnych wierzchołków konturu. W przypadku, gdy fragment konturu jest łukiem kołowym wybieramy opcję łuk przez trzy punkty (*początek → środek → koniec* (górna) lub *początek → koniec → środek* (dolna)), a następnie wprowadzamy trzy punkty łuku, po wprowadzeniu każdego z nich klikając przycisk *Dodaj*.



Współrzędne pozostałych wierzchołków konturu możemy podawać, wprowadzając je bezpośrednio do zaznaczonego okna (strzałka) i klikając przycisk *Dodaj* lub wskazując je kolejno myszą. Aby zakończyć wprowadzanie konturu, należy ponownie wskazać wierzchołek, od którego rozpoczęliśmy wprowadzanie współrzędnych.

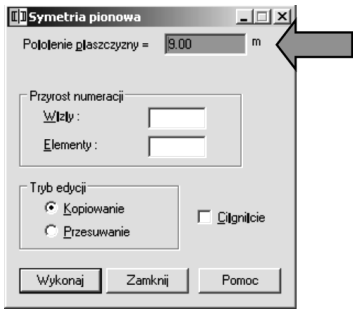
W naszym przypadku zdefiniujemy trzy polilinie:

– kwadrat o wierzchołkach (**0,00**, **0,00**; **0,00**, **3,00**; **3,00**, **3,00**; **3,00**, **0,00**) m,
– kwadrat z zaokrągloną krawędzią o wierzchołkach (**0,00**, **3,00**; **0,88**, **5,12**; **3,00**, **6,00**; **3,00**, **3,00**) m,
– kwadrat o wierzchołkach (**3,00**, **3,00**; **3,00**, **6,00**; **6,00**, **6,00**; **3,00**, **6,00**) m,

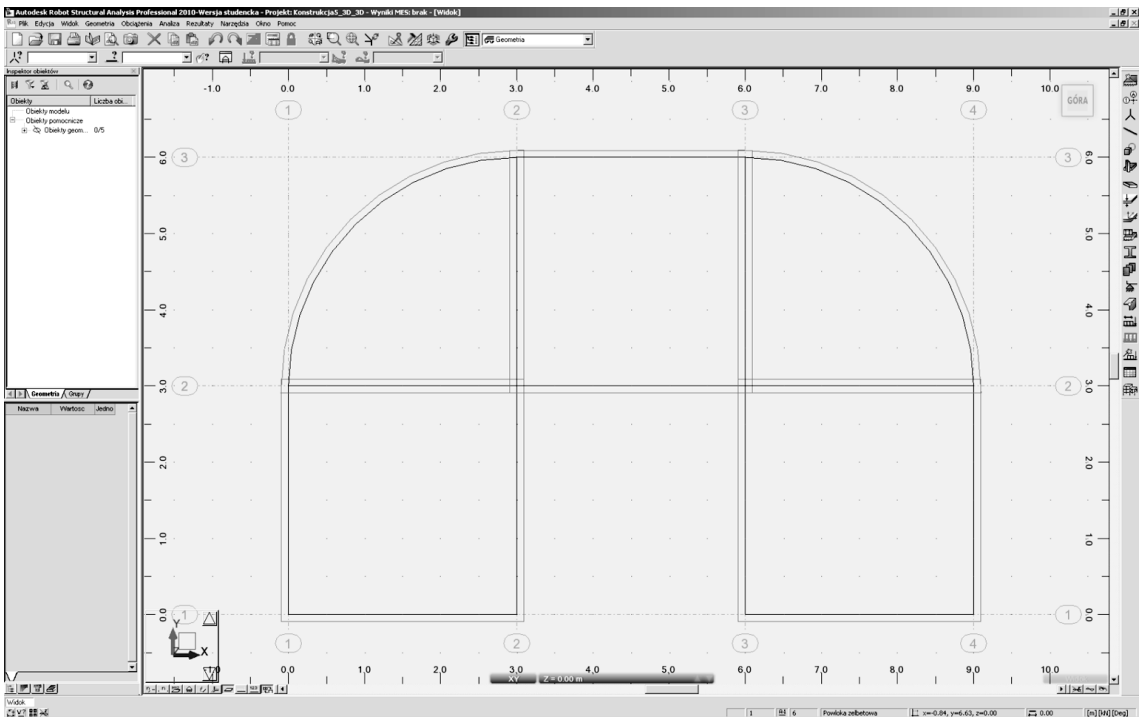
UWAGA: Jeżeli wierzchołek wskazujący środek łuku ma być wprowadzony precyzyjnie, należy jego współrzędne obliczyć i wprowadzić do okna z dokładnością do przynajmniej dwóch cyfr znaczących. W naszym przypadku dla polilinii z zaokrągloną krawędzią będzie to punkt o współrzędnych (**0,88**, **5,12**) m.

Kontur krzywoliniowy jest interpolowany łamaną, której parametry są dostępne w oknie *Polilinia – kontur* po wciśnięciu przycisku *Parametry*. Podstawowym parametrem interpolacji mającym wpływ na kształt obszaru obliczeniowego jest gęstość podziału (strzałka), decydująca o tym przez ile równomiernie rozmieszczonych na brzegu krzywoliniowym punktów będzie przechodzić łamana.

Zaznaczamy dwie polilinie po lewej stronie. W celu uzyskania konstrukcji jak na rysunku poniżej dokonamy ich zwierciadlanego odbicia względem prostej równoległej do osi ***Y*** przechodzącej przez punkt (**4,50**, **0,00**) m. Dalej otwieramy okno dialogowe *Symetria pionowa* (***Edycja → Edytuj → Lustro pionowe...***) i we wskazanym strzałką oknie wprowadzamy rzędną dowolnego punktu leżącego na osi symetrii, pozostawiając pozostałe parametry bez zmian:

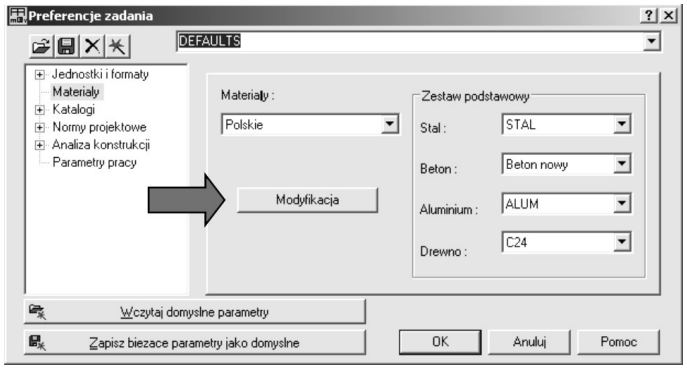


Po wykonaniu wszystkich wymienionych powyżej operacji konstrukcja powinna wyglądać następująco:

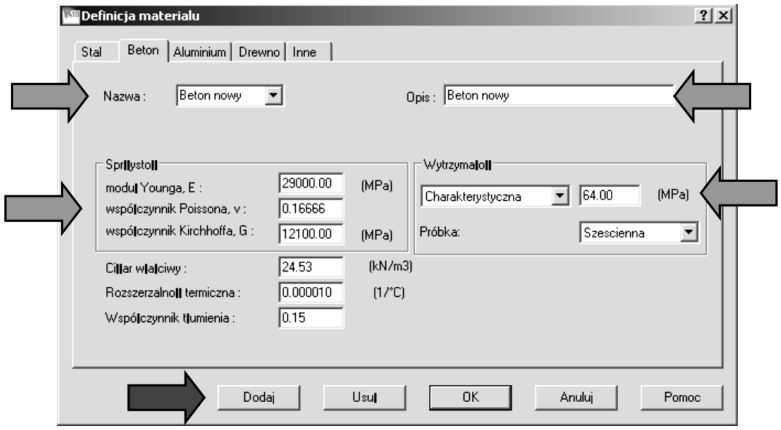


4. Nowy materiał

Definiujemy materiał konstrukcji o nietypowych parametrach. Będzie to beton o wytrzymałości charakterystycznej mierzonej na próbce sześciennej wynoszącej 64 MPa i współczynniku Poissona równym 1/6. W tym celu otwieramy okno dialogowe *Definicja materiału* (***Narzędzia → Preferencje zadania → Materiały***) i wciskamy przycisk *Modyfikacja* (strzałka):



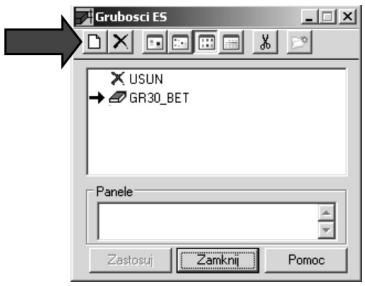
w rezultacie pojawi się poniższe okno, w którym w zakładce *Beton* wprowadzamy kolejno: nazwę, opis (**Beton nowy**), wartość współczynnika Poissona i wytrzymałość charakterystyczną:



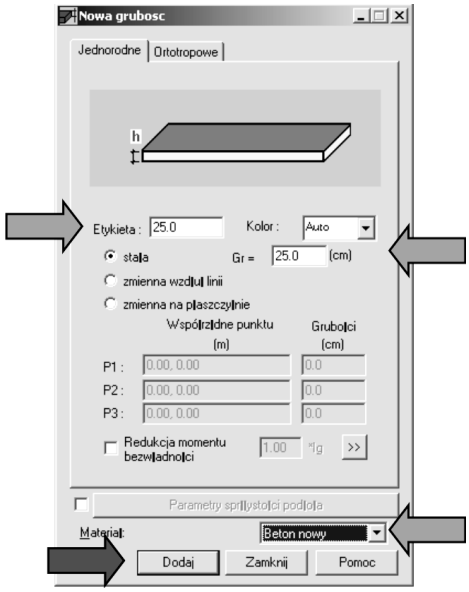
wprowadzone modyfikacje akceptujemy, klikając kolejno przyciski *Dodaj* i *OK*. Dalej zamykamy pozostałe okno.

5. Grubość elementów skończonych

Definiujemy nowe grubości płyty izotropowej (***Geometria → Charakterystyki → Grubość...***). W oknie dialogowym, które się pojawiło (*Grubości ES*) uruchamiamy opcję definiowania nowej grubości elementów skończonych, klikając symbol kartki papieru (strzałka):



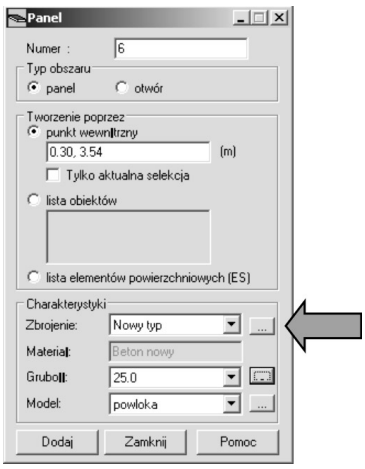
W oknie dialogowym *Nowa grubość*, które pojawiło się w wyniku, na zakładce *Jednorodne* zdefiniujemy dwie nowe grubości materiału płyty, **25** i **20** cm, za każdym razem podając w odpowiednich oknach dialogowych grubość (w centymetrach!) i etykietę (po której będziemy odróżniać zdefiniowaną przez nas grubość) oraz wybierając *Beton nowy* jako materiał:



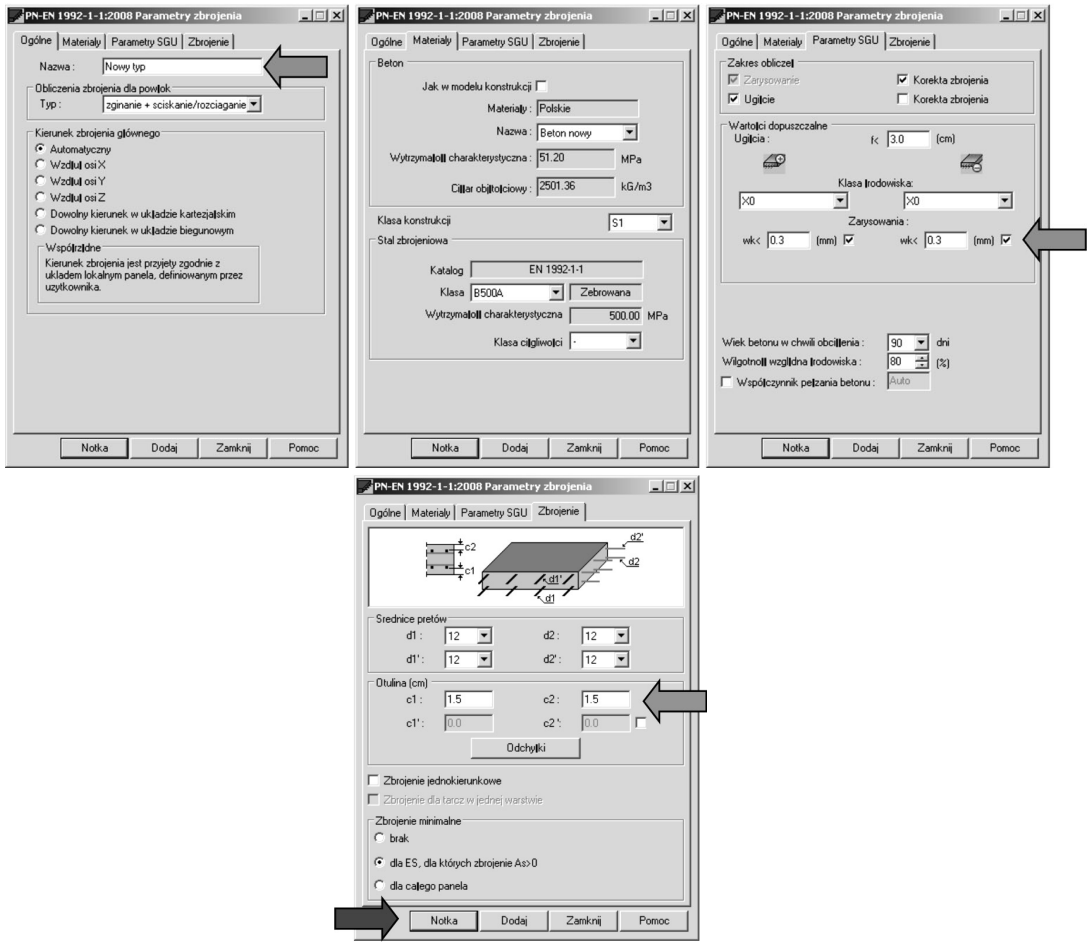
za każdym razem wprowadzone modyfikacje akceptujemy przyciskiem *Dodaj*, wprowadzanie informacji o grubościach kończymy przyciskiem *Zamknij*. Po poprawnym wykonaniu powyższej procedury okno dialogowe *Grubości ES* winno wyglądać jak poniżej:

6. Tworzenie paneli

Zdefiniowane uprzednio kontury zamieniamy na panele (obiekty, którym możemy przypisać własności geometryczne (grubość), fizyczne (materiał) i obliczeniowe (model obliczeniowy) (***Geometria → Panele...***):

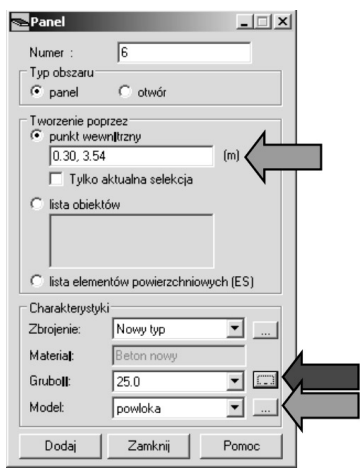


w oknie dialogowym *Panel*, po wciśnięciu wskazanego strzałką przycisku mamy ponadto możliwość ustalenia charakterystyk normowych potrzebnych do obliczeń zbrojenia, takich jak kierunek zbrojenia głównego (o większym ramieniu sił wewnętrznych), materiały (beton i stal), parametry Stanu Granicznego Użytkowania (dopuszczalne ugięcia, klasa środowiska, rozmiar rys, średnice prętów zbrojeniowych). Robi się to na kolejnych zakładkach okna dialogowego *Parametry zbrojenia*:

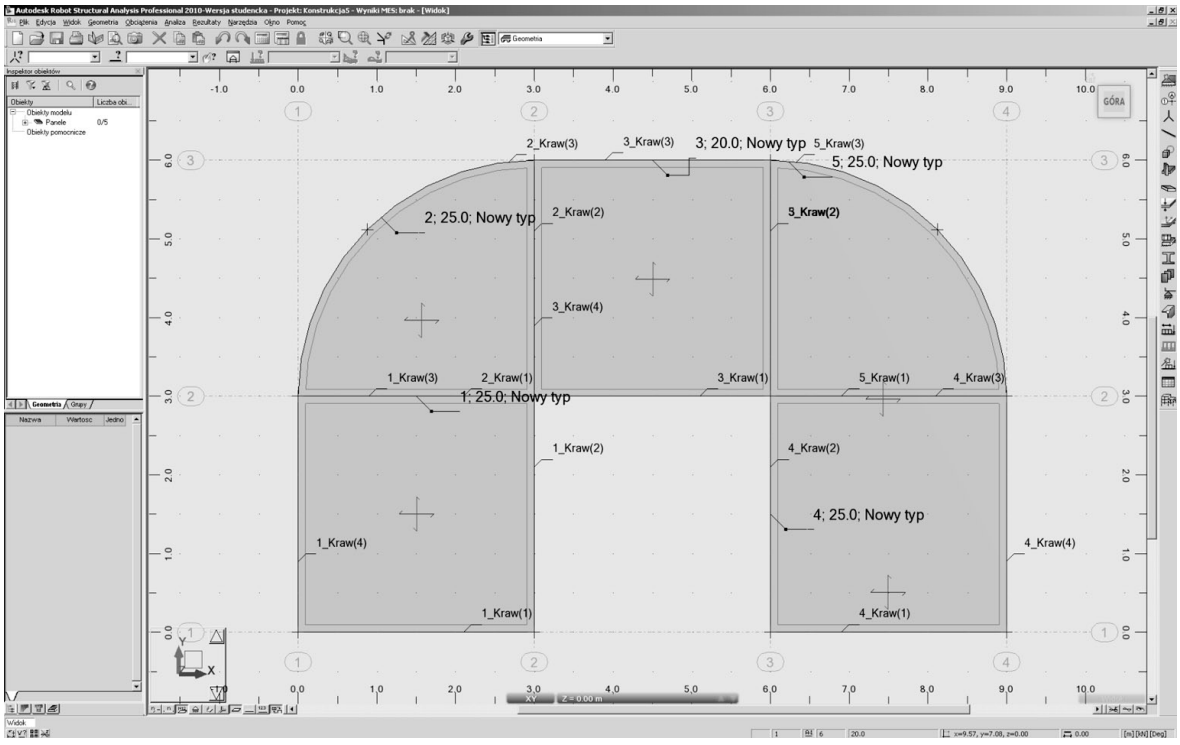


Dla potrzeb naszego zadania w zakładce *Parametry SGU* tego okna dialogowego ustalimy *Zarysowanie* $wk < \mathbf{0,3}$ mm (strzałka), w zakładce *Zbrojenie* ustalimy grubość otuliny prętów zbrojenia górnego i dolnego równą **1,5** cm, a w zakładce *Ogólne* nadamy tak zdefiniowanemu typowi zbrojenia nazwę *Nowy typ* (strzałka). Na zakończenie jak zwykle akceptujemy zmiany przyciskami *Dodaj* i *Zamknij*. Jeżeli dla celów dokumentacyjnych chcemy utworzyć notkę obliczeniową, możemy to zrobić przed zamknięciem okna dialogowego za pomocą przycisku *Notka*.

Panele tworzymy, wskazując myszą dowolny punkt wewnętrzny zamkniętego konturu po uprzednim uaktywnieniu okna *punkt wewnętrzny* (strzałka), pamiętając o tym, że panel centralny ma grubość 20 cm, a wszystkie pozostałe 25 cm (strzałka). Pamiętamy o ustaleniu modelu obliczeniowego MES (*Model*) jako powłoki, którą należy wybrać z listy rozwijalnej (strzałka).



Po poprawnym wykonaniu wszystkich wymienionych powyżej operacji konstrukcja powinna wyglądać następująco:



7. Podpory

Wprowadzamy podpory (utwierdzenie) na wewnętrznych krawędziach paneli kwadratowych (krawędzie 3 panelu 2, 1 panelu 3 i 3 panelu 5) (***Geometria → Podpory...***):

pamiętając o uprzednim wyborze zakładki *Liniowe* (podparta będzie cała krawędź płyty, a nie tylko wybrane punkty leżące na tej krawędzi).

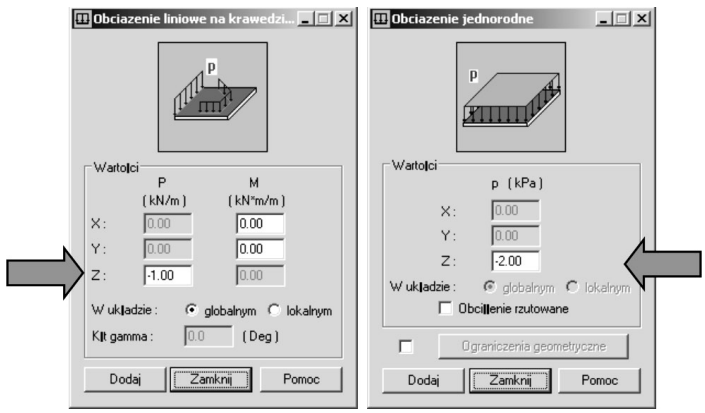
8. Obciążenia i ich kombinacje

Wprowadzamy trzy przypadki obciążeń (***Obciążenia → Przypadki...***) w postaci:

– obciążenia stałego (***STA1***) ciężarem własnym konstrukcji,
– obciążenia stałego (***STA2***) barierką na niepodpartej zewnętrznej części konturu wszystkich paneli,
– obciążenia eksploatacyjnego (***EKSP1***) na całej powierzchni paneli.

Wszystkie obciążenia zadajemy na zakładce *Powierzchnia* okna dialogowego *Obciążenie* (***Obciążenia → Definicja obciążeń...***):

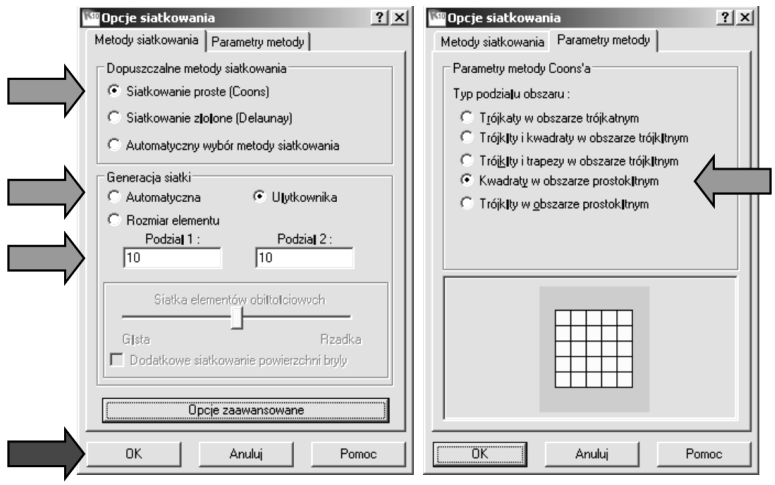
Dla obciążenia ***STA2*** definiujemy *Obciążenie liniowe na krawędziach* o intensywności **–1,00** kN/m, a w przypadku obciążenia ***EKSP1*** definiujemy *Obciążenie jednorodne o intensywności* **–2,00** kPa.



Kombinacje obciążeń generujemy automatycznie według normy EC Simplified (***Obciążenia → Kombinacje automatyczne...***), więc w oknie dialogowym *Kombinacje normowe przypadków* wybieramy **Kombinacje automatyczne kompletne**.

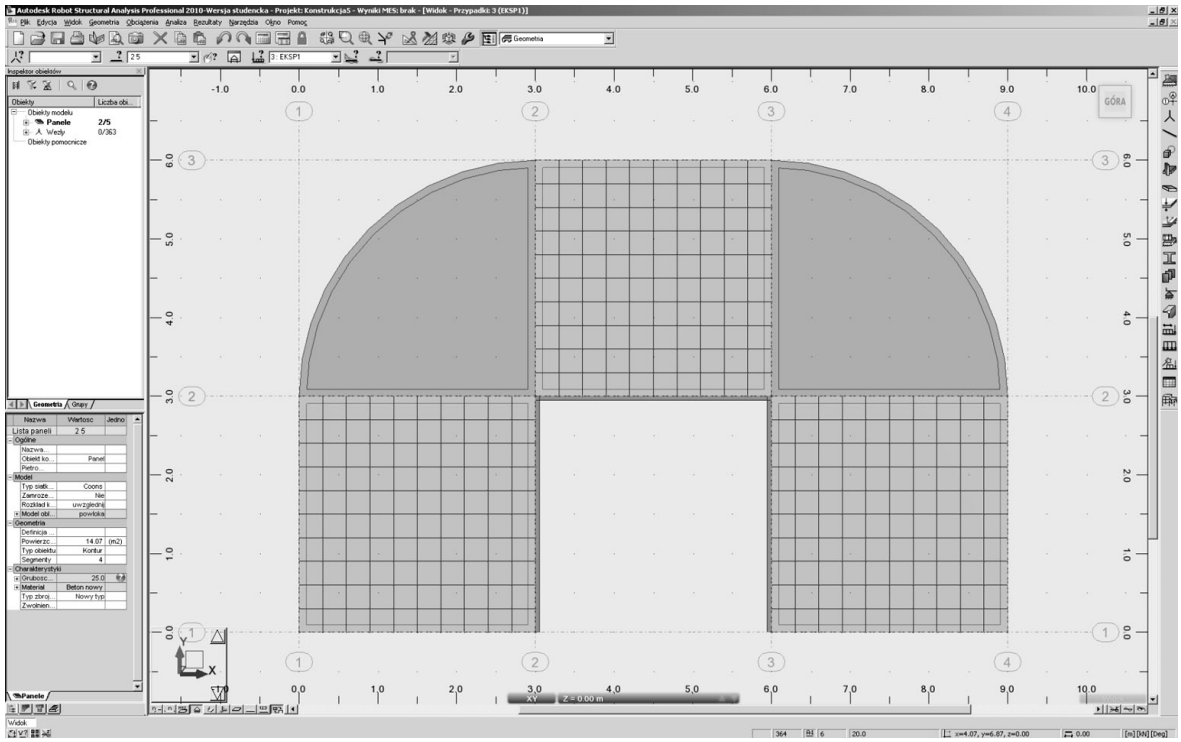
9. Siatka obliczeniowa MES

Ustalamy sposób generacji siatki obliczeniowej Metody Elementów Skończonych (***Analiza → Model obliczeniowy → Opcje siatkowania...***), najpierw wskazując panele, dla których chcemy ustalić parametry generacji. Dla paneli kwadratowych w oknie dialogowym *Opcje siatkowania* na zakładce *Metody siatkowania* wybierzemy **Siatkowanie proste**, siatkę **Użytkownika** przy podziale **10 × 10,** a na zakładce *Parametry metody* **Kwadraty w obszarze prostokątnym** (strzałki):

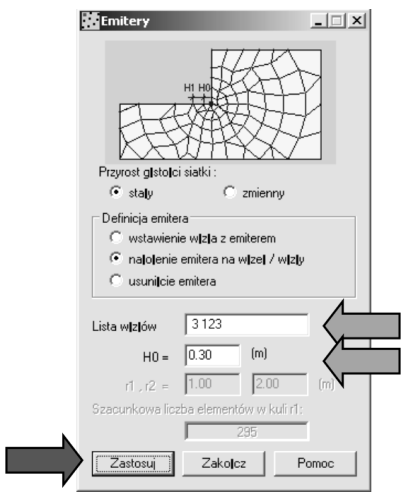


Zmienione wartości parametrów zatwierdzamy przyciskiem *OK*.

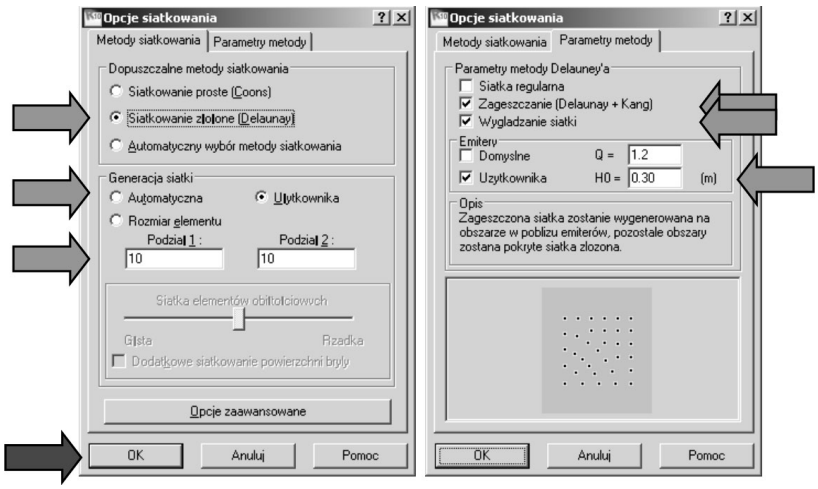
Po ustaleniu parametrów generacji możemy utworzyć siatkę MES na wybranych panelach (***Analiza → Model obliczeniowy → Lokalna generacja siatki***). Aby uchronić się przed przypadkową zmianą siatki MES na tych panelach w trakcie jej tworzenia dla pozostałych dwu paneli, winniśmy gotową siatkę zamrozić (***Analiza → Model obliczeniowy → Zamrożenie siatki***). Po wykonaniu omówionych powyżej operacji siatka ES powinna wyglądać następująco:



Dla paneli o brzegu zakrzywionym definiujemy emitery w wierzchołkach leżących naprzeciw łuku (***Analiza → Model obliczeniowy → Emitery...***) przez nałożenie emiterów na węzeł/węzły i ustalając rozmiar oczka siatki w otoczeniu emitera na **0,30** m:

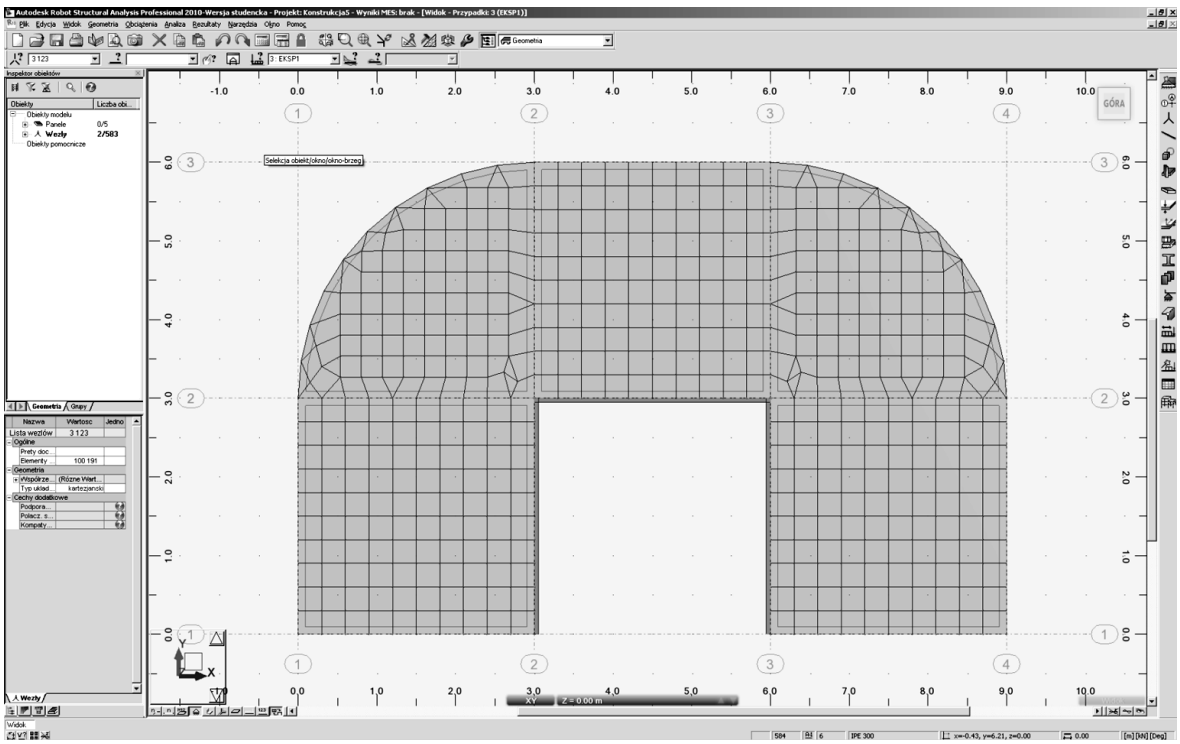


na zakończenie zatwierdzamy wybór przyciskami *Zastosuj* i *Zakończ*. W oknie dialogowym *Opcje siatkowania* na zakładce *Metody siatkowania* wybierzemy **Siatkowanie złożone**, siatkę **Użytkownika** przy podziale **10 × 10**, a na zakładce *Parametry metody* **Zagęszczanie** i **Wygładzanie siatki** oraz *Emitery* **Użytkownika** (strzałki):



Na zakończenie jak zwykle zatwierdzamy zmiany przyciskiem *OK*.

Po ustaleniu parametrów generacji możemy utworzyć siatkę MES na wybranych panelach (***Analiza → Model obliczeniowy → Lokalna generacja siatki***). Aby uchronić się przed przypadkową zmianą siatki MES w trakcie dalszej pracy, gotową siatkę zamrażamy (***Analiza → Model obliczeniowy → Zamrożenie siatki***). Po wykonaniu omówionych powyżej operacji siatka ES powinna wyglądać następująco:

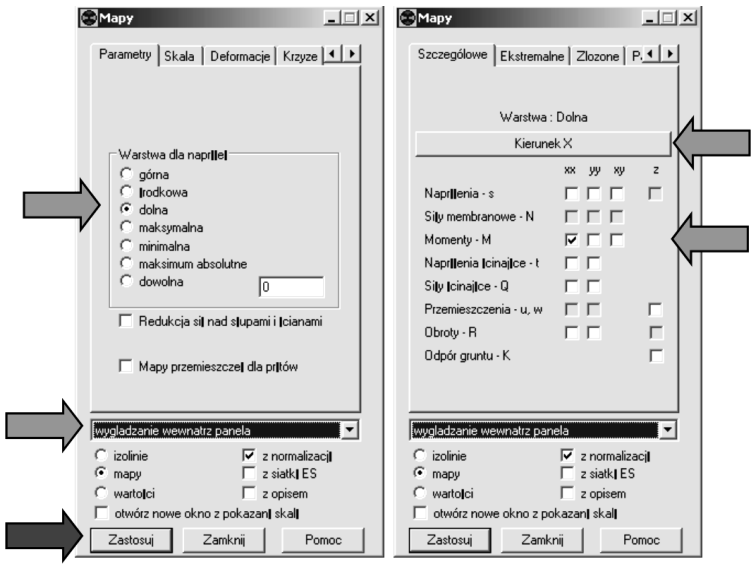


10. Analiza konstrukcji

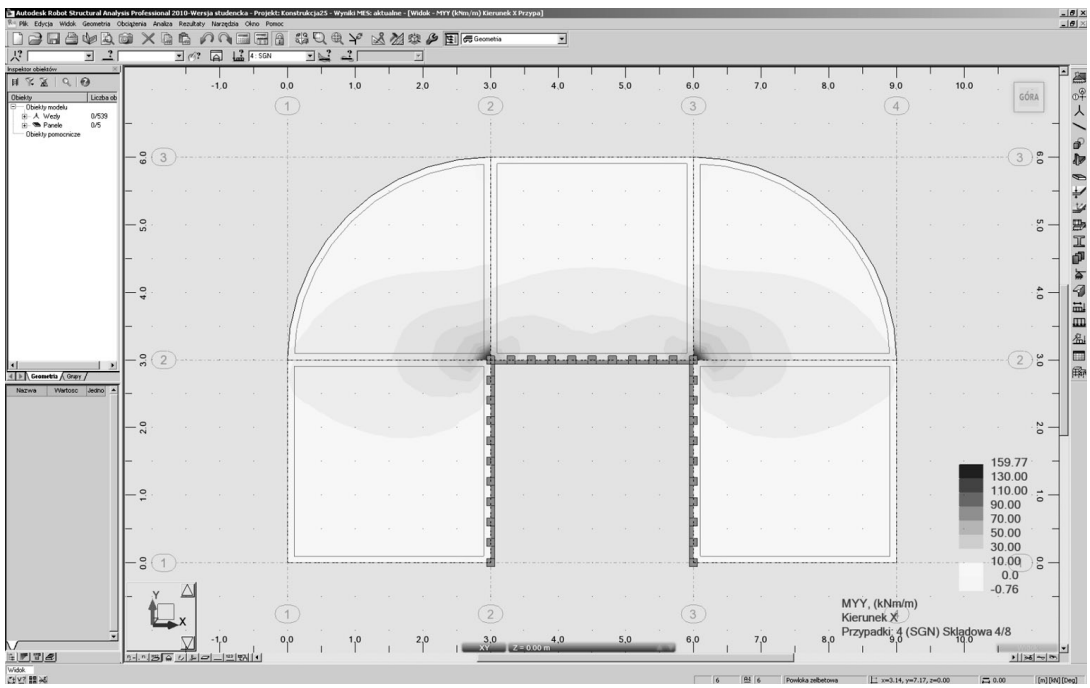
Uruchamiamy obliczenia (***Analiza → Obliczenia***).

11. Prezentacja wyników

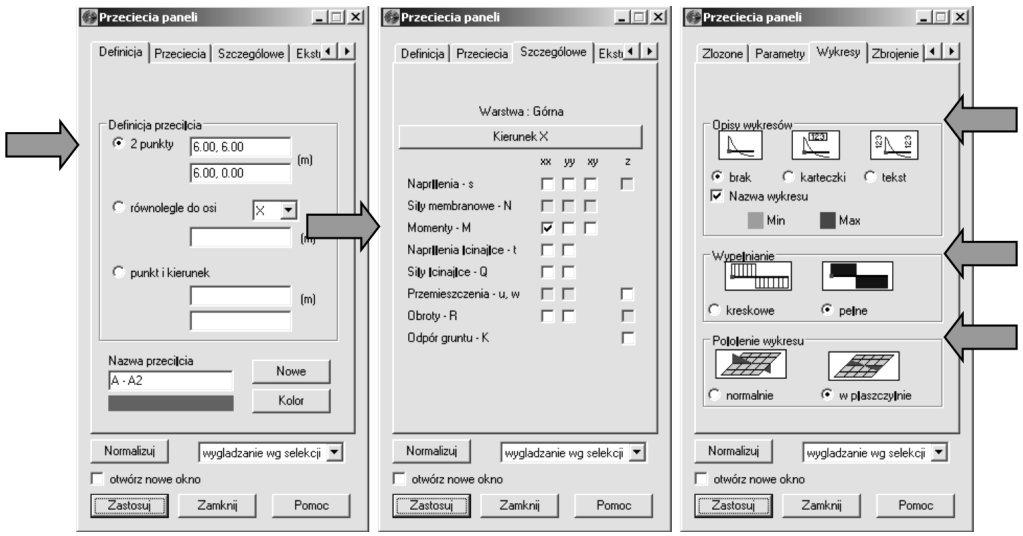
Po wykonaniu obliczeń przechodzimy do modułu prezentacji wyników (***Rezultaty → Mapy...***), w oknie dialogowym *Mapy* w zakładce *Parametry* ustawiamy parametry prezentacji: warstwę dla naprężeń, sposób uśredniania wyników (tylko we wnętrzu paneli), a w zakładce *Szczegółowe* wybieramy prezentowaną wielkość (np. moment M_{xx}) i włączamy normalizację wykresu (*Normalizuj*) oraz zatwierdzamy wybór przyciskiem *Zastosuj*:



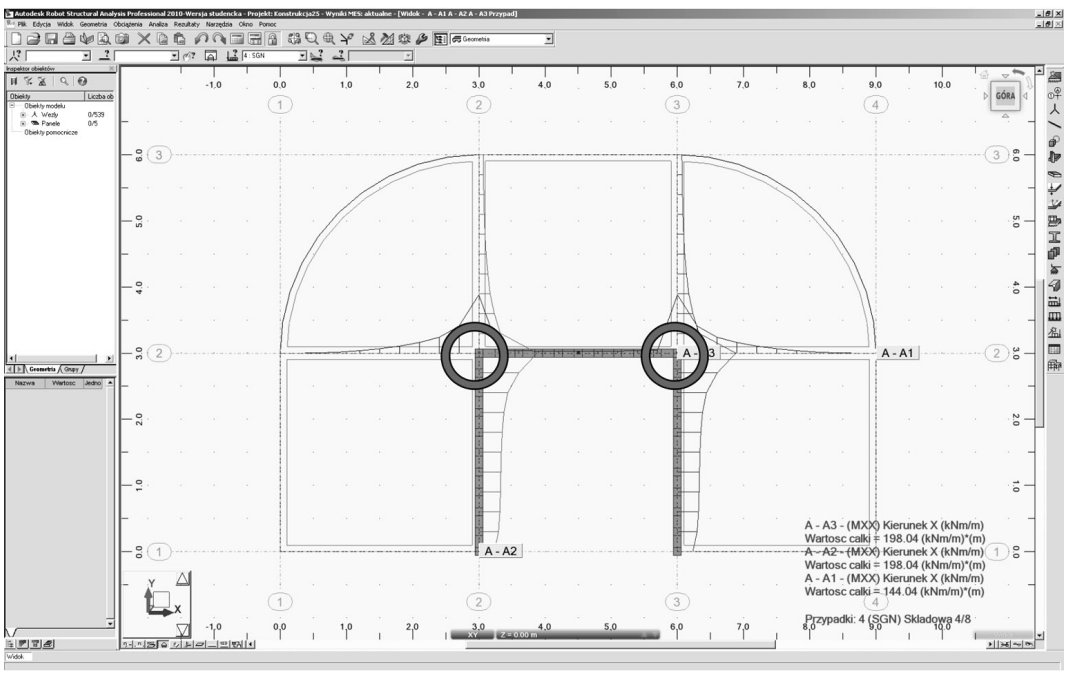
Wykres momentu zginającego M_{yy} w Stanie Granicznym Nośności powinien wyglądać jak na poniższym rysunku:



Możliwe jest również zaprezentowanie rozkładu wybranej siły przekrojowej na wskazanej przez użytkownika linii (***Rezultaty → Przecięcia paneli...***). W tym celu w oknie dialogowym *Przecięcia paneli* na zakładce *Definicja* należy zdefiniować linię, wzdłuż której dokonywane będzie przecięcie, podając dwa punkty lub punkt i kierunek, a następnie zatwierdzić wybór przyciskiem *Zastosuj*. Można zdefiniować wiele linii przecięcia, powtarzając powyższe operacje. W zakładce *Szczegółowe* określamy, która siła przekrojowa będzie prezentowana na zdefiniowanym przecięciu, a w zakładce *Wykresy* ustalamy sposób prezentacji (opis, wypełnienie i położenie wykresu):

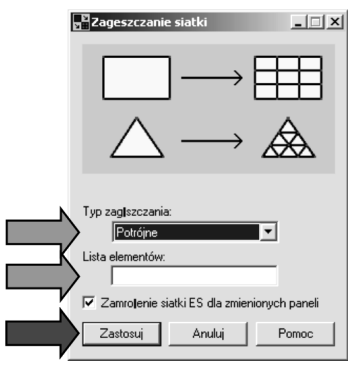


Wykresy uogólnionej siły przekrojowej M_{xx} w Stanie Granicznym Nośności na trzech liniach przedstawiono poniżej:

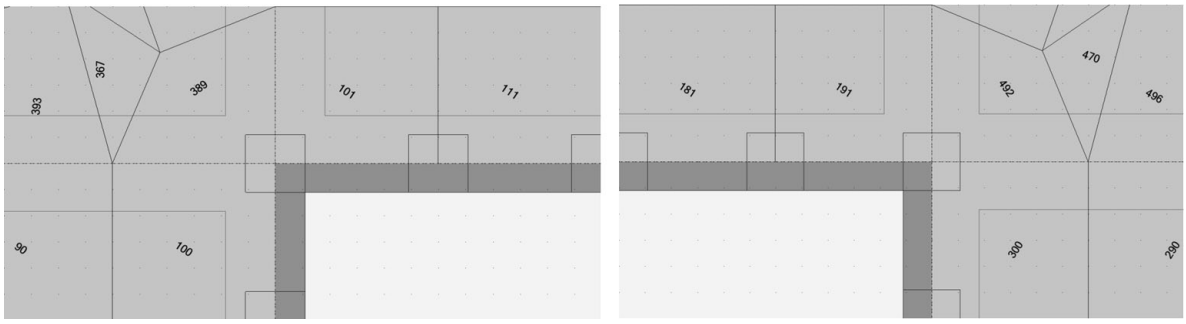


12. Zagęszczanie siatki

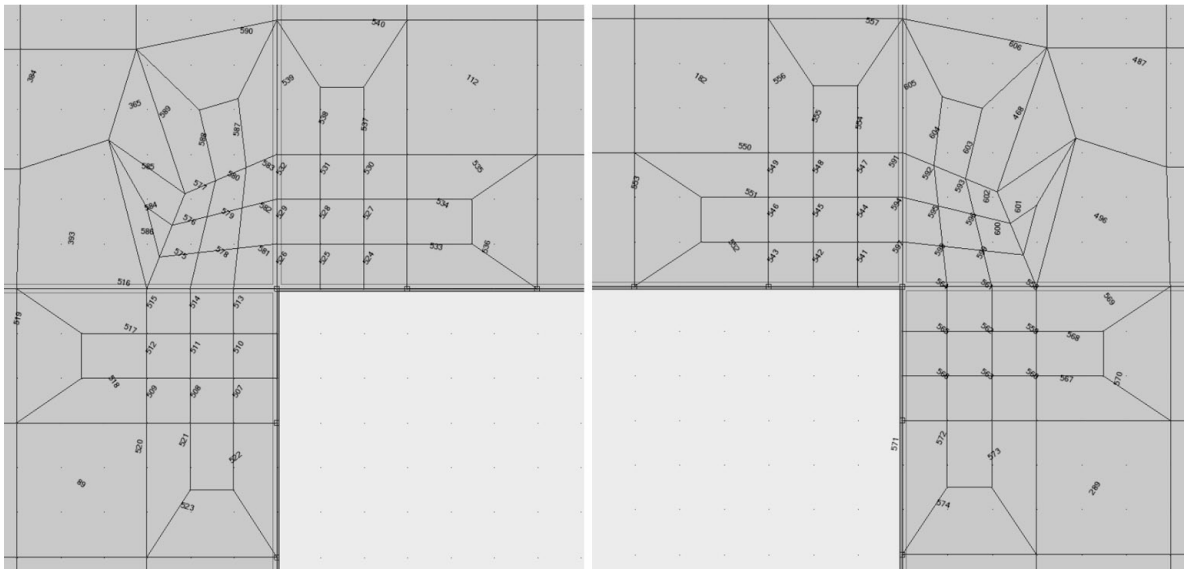
Dla prześledzenia wpływu podziału obszaru na elementy skończone (np. ***Analiza → Model obliczeniowy → Zagęszczanie siatki...***) na wyznaczone wartości sił przekrojowych dokonamy zagęszczenia siatki w otoczeniu wewnętrznych naroży płyty (kółka na rysunku powyżej). W oknie dialogowym *Zagęszczanie siatki*:



można wybrać typ zagęszczenia (podwójne bądź potrójne) (strzałka), a następnie należy wskazać (myszą) lub wpisać w oknie *Lista elementów* numery elementów skończonych, które mają zostać podzielone. Wybór jak zwykle zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj*. W naszym przypadku podzielimy elementy o numerach: 100, 101, 191, 300, 389, 492.



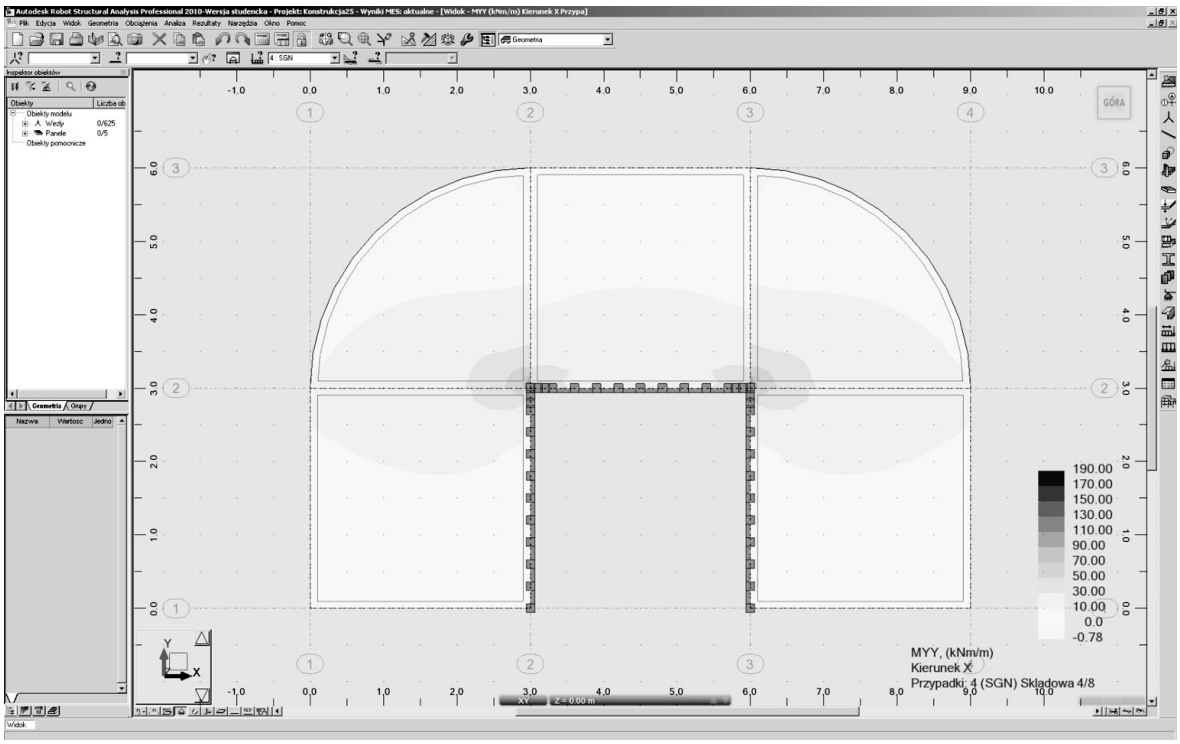
Po zagęszczeniu siatka w otoczeniu naroży będzie wyglądała następująco:



Aby wprowadzone przez nas modyfikacje siatki elementów skończonych nie zostały utracone w trakcie dalszych obliczeń, zdecydowanie należy ją zamrozić przed kontynuacją pracy.

UWAGA: Podział wskazanego elementu skończonego na mniejsze prowadzi do modyfikacji innych elementów skończonych w otoczeniu elementu podzielonego i renumeracji węzłów oraz elementów skończonych w konstrukcji;
zmiana siatki MES w trakcie obliczeń powoduje, że wyniki stają się nieaktualne i obliczenia należy przeprowadzić ponownie.

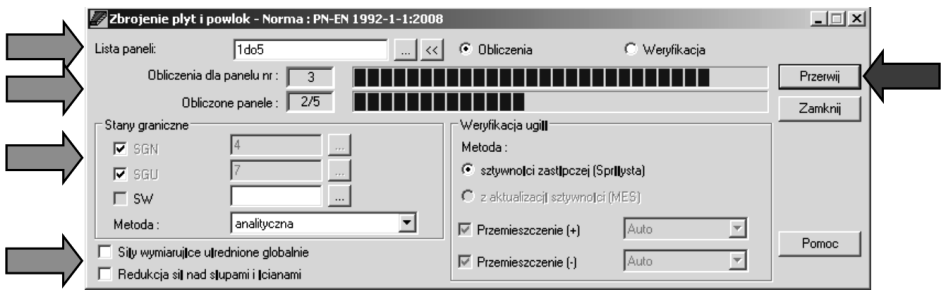
Wykres momentu zginającego M_{yy} w Stanie Granicznym Nośności po zagęszczeniu siatki powinien wyglądać jak na poniższym rysunku:



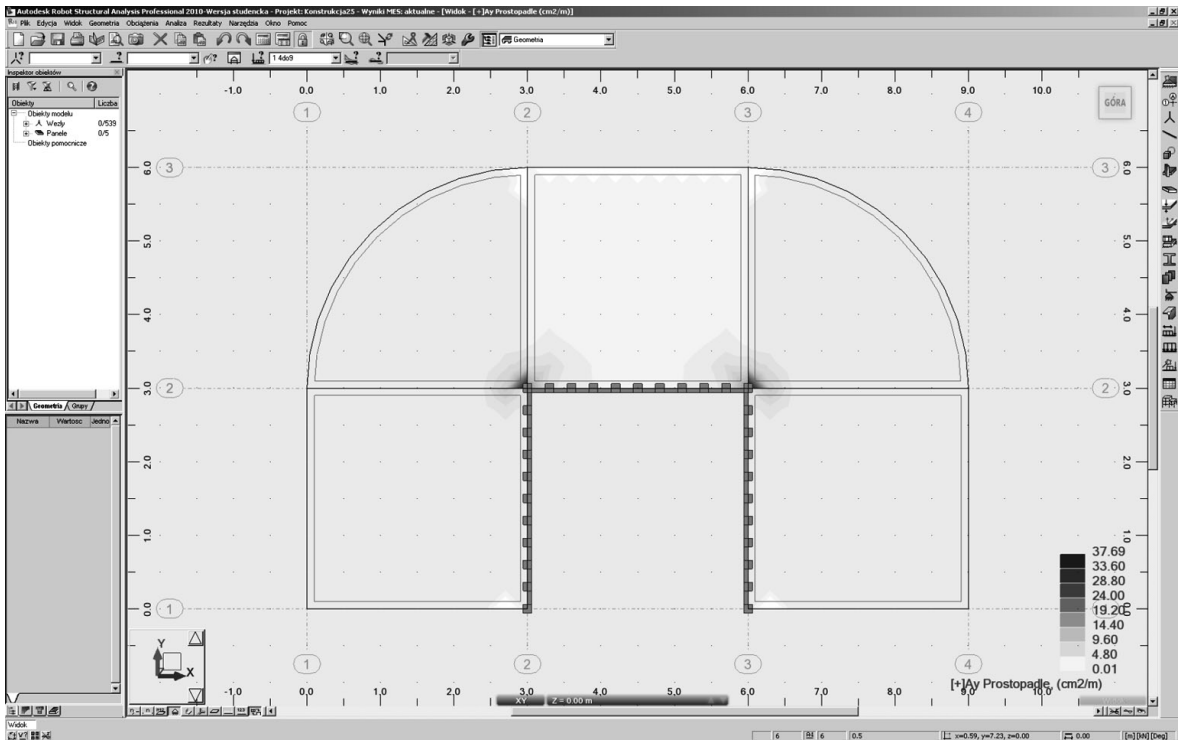
Jak widać rozkład momentu zginającego na powierzchni płyty nie zmienił się znacząco, natomiast istotnie wzrosły wartości w podpartych narożach.

13. Obliczenia zbrojenia

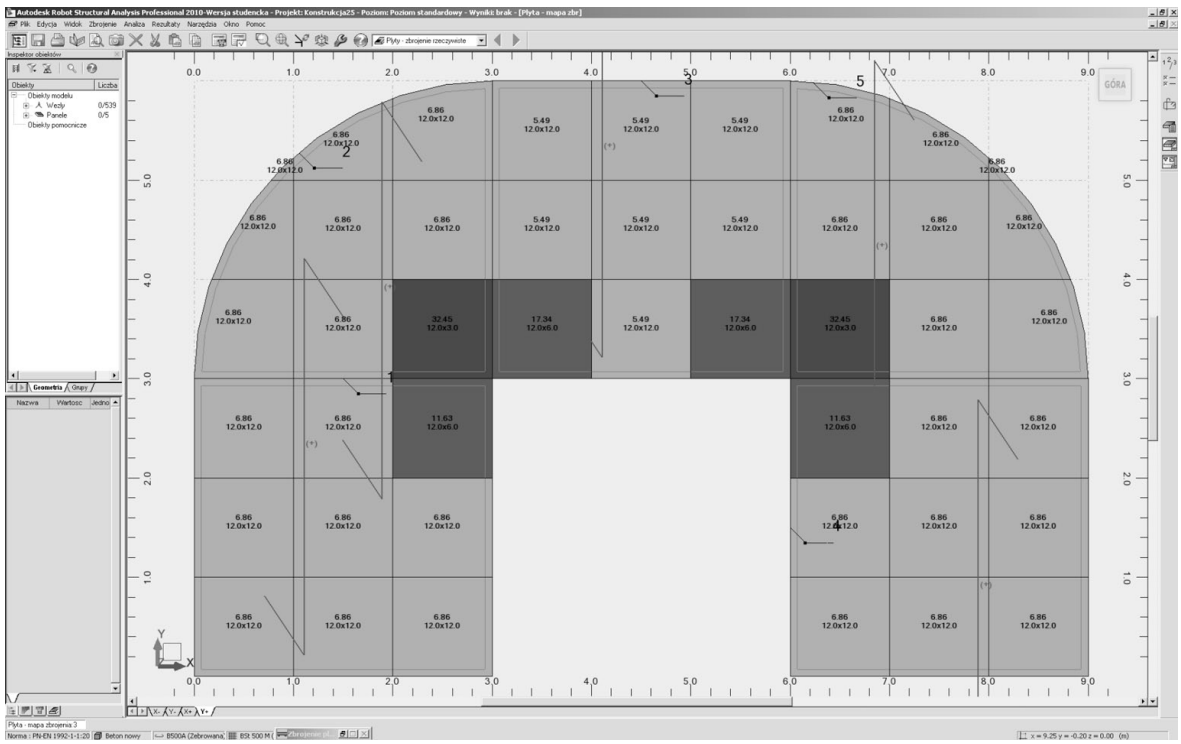
Zbrojenie płyty rozpoczynamy od uruchomienia modułu obliczającego zbrojenie teoretyczne (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie paneli żelbetowych → Obliczenia...***). W oknie dialogowym *Zbrojenie płyt i powłok* mamy możliwość ustalenia, dla których paneli będą prowadzone obliczenia, wyboru przypadku obciążeniowego lub Stanu Granicznego, metody wyznaczania powierzchni zbrojenia oraz postępowania z siłami wymiarującymi (strzałki). Jeżeli przed rozpoczęciem obliczeń nie wskażemy w stosownym oknie numerów paneli, dla których mają być prowadzone obliczenia, obliczenia zostaną wykonane dla wszystkich paneli konstrukcji. Postęp pracy jest pokazywany za pomocą dwóch pasków stanu. Ponieważ obliczenia mogą być długotrwałe, w każdej chwili możemy je zatrzymać za pomocą przycisku *Przerwij*.



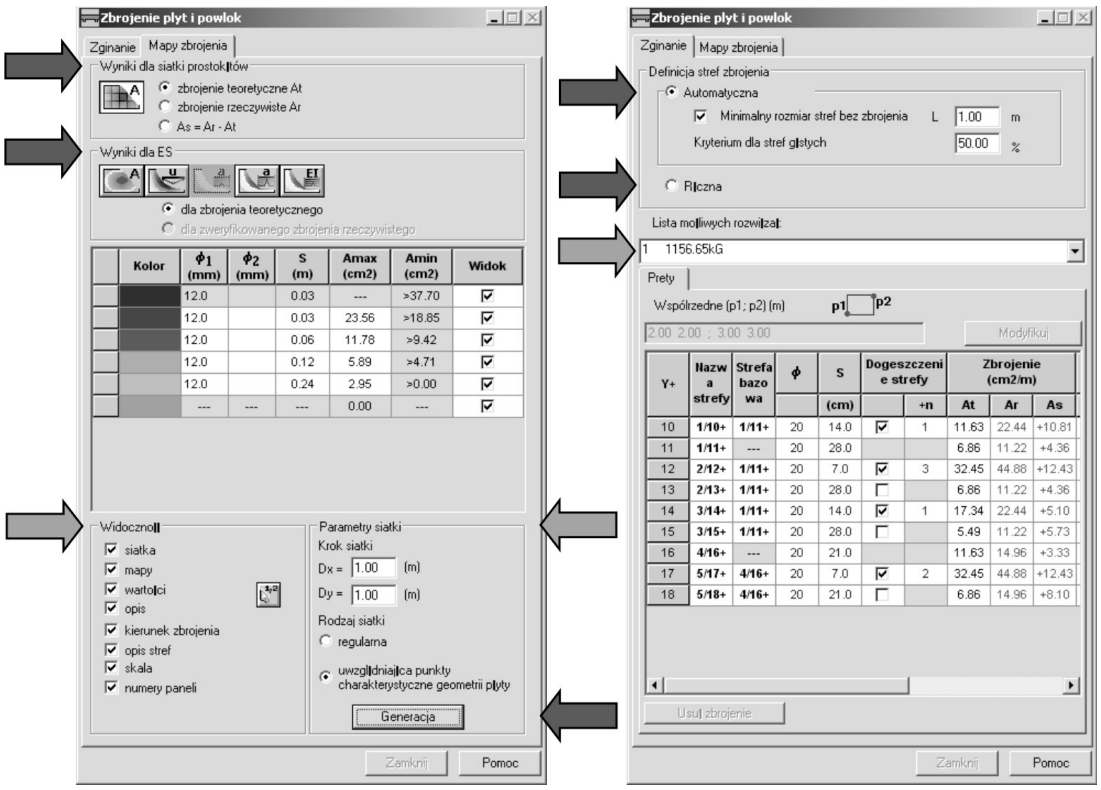
Po obliczeniu zbrojenia teoretycznego (minimalnego wymaganego obliczeniowo) możemy obejrzeć jego mapy (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie paneli żelbetowych → Zbrojenie teoretyczne***) w obydwu kierunkach głównych dla warstwy górnej (+) i dolnej (–) w postaci planów warstwicowych:



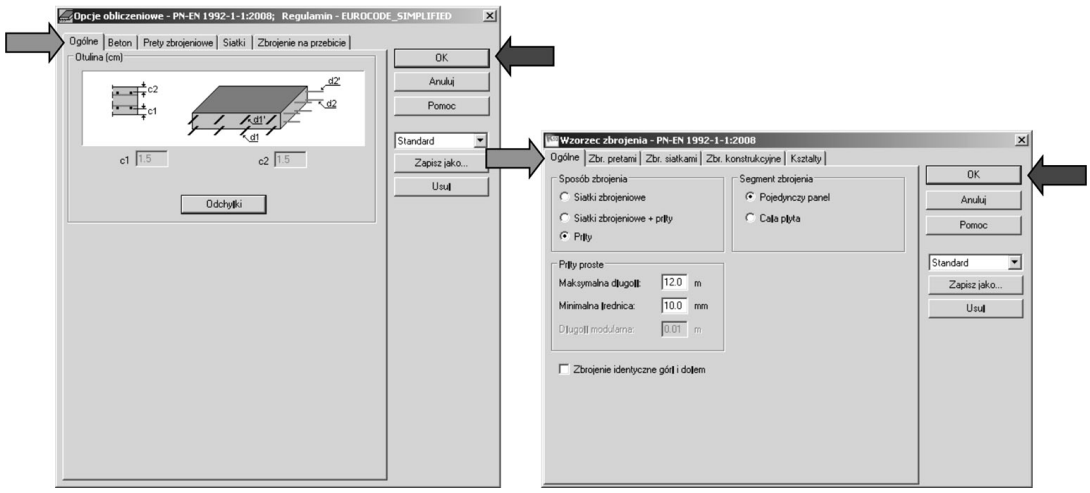
oraz prostokątnych map zbrojenia:



Ta druga opcja dostępna jest dopiero po uruchomieniu obliczeń zbrojenia rzeczywistego (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie paneli żelbetowych → Zbrojenie rzeczywiste***). Sposób prezentacji prostokątnych map zbrojenia ustala się w oknie dialogowym *Zbrojenie płyt i powłok*:

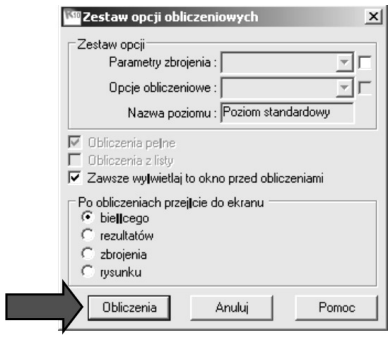


W oknie tym możemy ustalić, czy oglądamy wyniki dla *Siatki prostokątów* (jej własności ustalamy w ramce *Parametry siatki* i akceptujemy przyciskiem *Generacja*) czy też *Elementów Skończonych*. W przypadku *Siatki prostokątów* możemy zdecydować, czy będzie prezentowane *Zbrojenie teoretyczne*, *Zbrojenie rzeczywiste* czy ich różnica. Oczywiście dwie ostatnie opcje są dostępne dopiero po zaprojektowaniu zbrojenia rzeczywistego. Pozostałe parametry prezentacji ustalamy w ramce *Widoczność*. Przed rozpoczęciem obliczeń zbrojenia rzeczywistego należy ustalić opcje obliczeniowe (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) i parametry zbrojenia (***Analiza → Parametry zbrojenia...***):

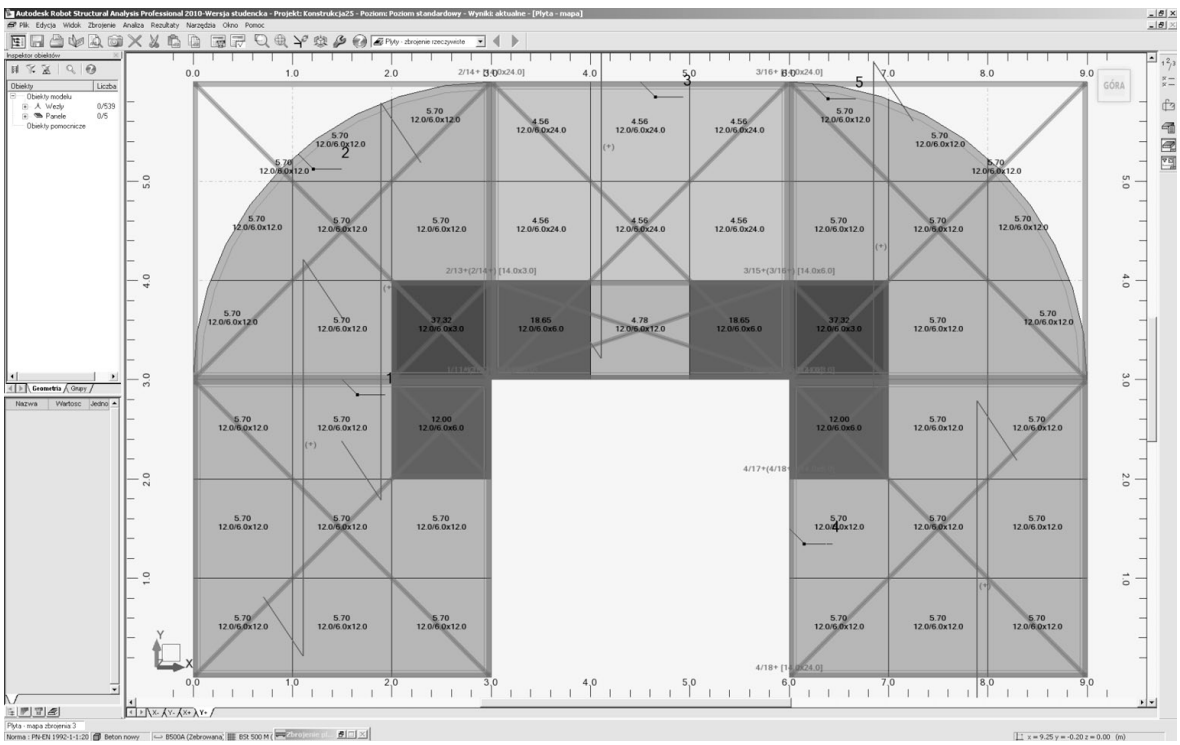


Na kolejnych zakładkach okna *Opcje obliczeniowe* możemy ustalić bądź zweryfikować: parametry otuliny i sposobu obliczania ugięć (*Ogólne*); parametry betonu zastosowanego w konstrukcji (*Beton*); klasę i dopuszczalne średnice prętów stali zbrojeniowej (*Pręty zbrojeniowe*); klasę, producenta i dopuszczalne typy siatek zbrojeniowych (*Siatki*); parametry zbrojenia na przebicie (*Zbrojenie na przebicie*). Na kolejnych zakładkach okna *Wzorzec zbrojenia* ustalamy sposób zbrojenia (pręty, siatki czy pręty i siatki) oraz wielkość segmentu zbrojenia (*Ogólne*); sposób rozmieszczania wkładek dolnych i górnych (*Zbr. prętami*); podział siatek w pionie i poziomie

oraz postępowanie wokół otworów (*Zbr. siatkami*); sposób zbrojenia konstrukcyjnego naroży otworów (*Zbr. konstrukcyjne*); obecność i kształt haków na końcach wkładek zbrojeniowych (*Kształty*). Zmiany wprowadzone w obydwu oknach akceptujemy przyciskiem *OK*. Po ustaleniu i weryfikacji wszystkich parametrów (w szczególności sposobu zbrojenia) uruchamiamy obliczenia zbrojenia rzeczywistego (***Analiza → Obliczenia...***):

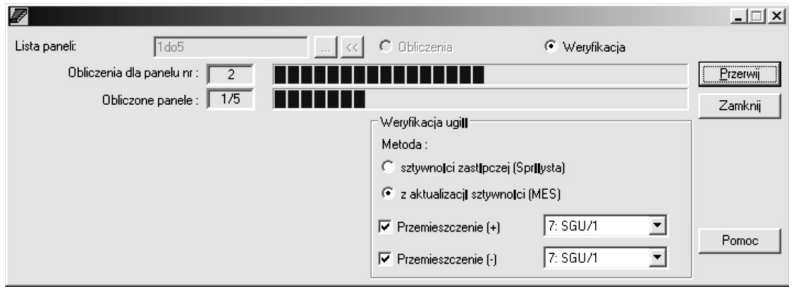


W oknie *Zestaw opcji obliczeniowych* mamy jeszcze raz możliwość wyboru parametrów zbrojenia i opcji obliczeniowych, jeżeli wcześniej zapamiętaliśmy je w plikach. Obliczenia zbrojenia uruchamiamy przyciskiem *Obliczenia*. Po wykonaniu obliczeń możemy obejrzeć proponowane przez program rozwiązania rozmieszczenia zbrojenia w układzie góra (+), dół (–) dla obydwu kierunków głównych:

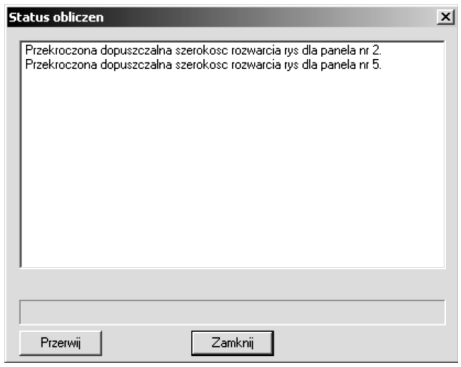


Parametry proponowanego rozkładu zbrojenia możemy obejrzeć w oknie *Zbrojenie płyt i powłok* na zakładce *Zginanie*. W tym samym oknie możemy obejrzeć inne warianty rozmieszczenia wkładek zbrojeniowych, uszeregowane w kolejności od najmniejszego do największego zużycia stali zbrojeniowej (strzałka) oraz, po wybraniu opcji **Ręczna**, dokonać ewentualnej modyfikacji tego zbrojenia lub wprowadzić własne rozmieszczenie wkładek, definiując kolejne prostokątne obszary rozmieszczania wkładek i podając ich średnice oraz rozstaw w każdym obszarze osobno.

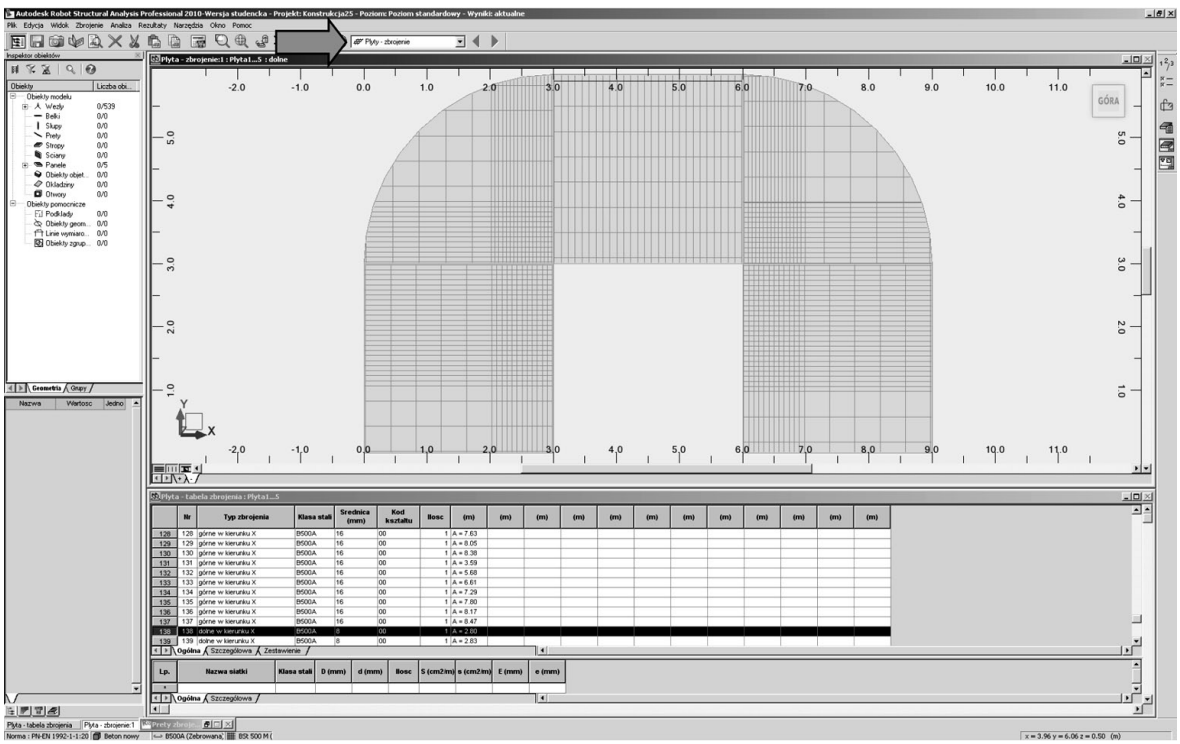
Po ostatecznym ustaleniu rozmieszczenia zbrojenia należy dokonać weryfikacji ugięć dla rzeczywistych warunków pracy płyty. Parametry weryfikacji ustala się w poniższym oknie (***Analiza → Weryfikacja...***):



Jeżeli w trakcie obliczeń wystąpią problemy (na przykład przekroczona dopuszczalna rozwartość rys), stosowny komunikat pojawi się w oknie *Status obliczeń*.

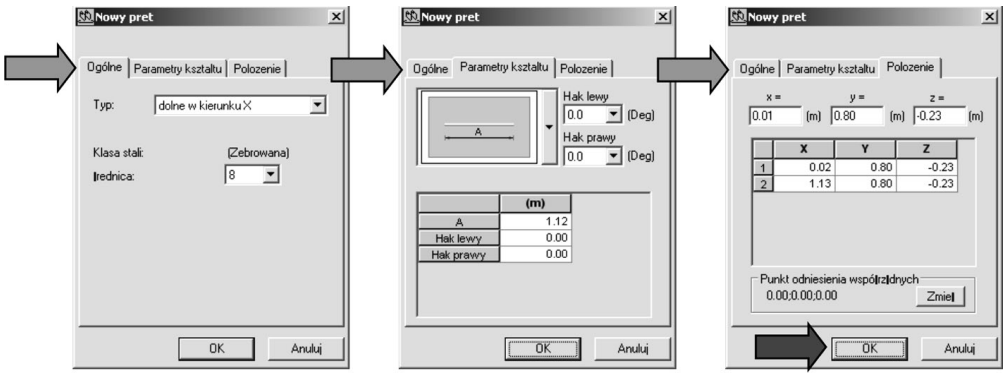


Po pozytywnym zweryfikowaniu zbrojenia możemy przejść do ekranu *Płyty – zbrojenie*, aby obejrzeć rozmieszczenie wkładek zbrojeniowych odpowiadające wybranemu wariantowi zbrojenia:



W górnej części okna widzimy pręty zbrojenia rozmieszczone na powierzchni zbrojonego elementu, natomiast w dolnej zestawienie tabelaryczne prętów zbrojeniowych i siatek użytych do zazbrojenia konstrukcji. Gdy wskażemy pręt lub pręty (*Shift + lewy*) na rysunku, w tabeli zostaną automatycznie podświetlone odpowiadające im wiersze. Możemy również wskazać grupę prętów myszą. Podobnie, gdy wskażemy wiersz lub wiersze (*Cntrl + lewy*) w tabeli, odpowiadające im pręty na rysunku zostaną podświetlone na czerwono.

Również na tym etapie mamy możliwość dokonania zmiany zbrojenia. Pręty dodatkowe umieszczamy na planie na zasadzie kopiowania z modyfikacją istniejących prętów. Wybieramy pręt do kopiowania, otwieramy okno dialogowe *Nowy pręt* (***Zbrojenie → Nowy pręt...***) i w jego kolejnych zakładkach ustalamy warstwę, kierunek i średnicę (*Ogólne*), długość i haki (*Parametry kształtu*) oraz położenie (*Położenie*). Zmiany akceptujemy przyciskiem *OK*.

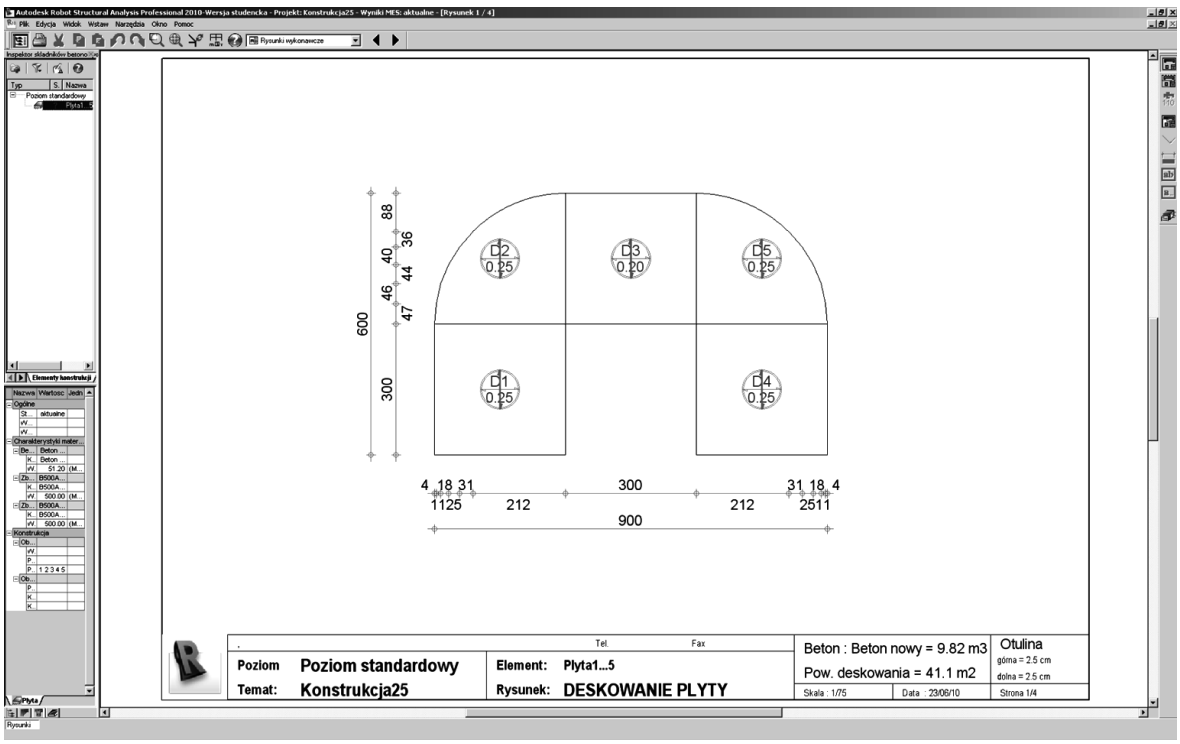


UWAGA: Operacja jest długotrwała.

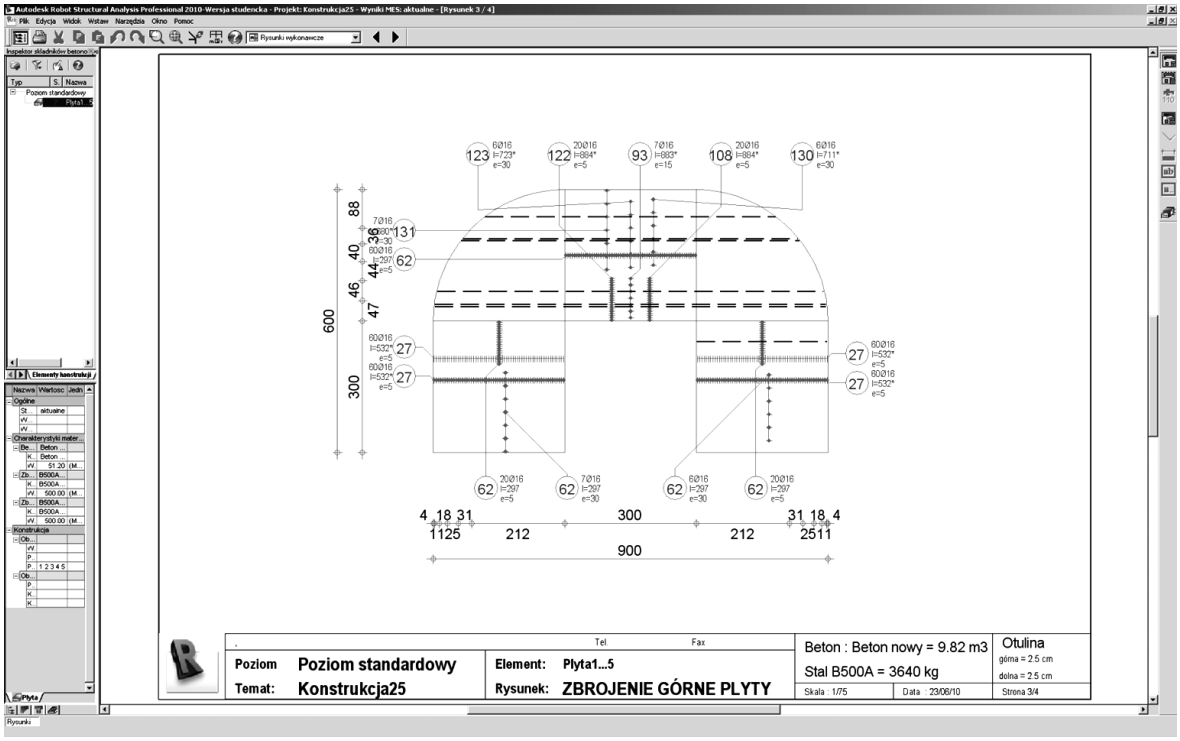
Usuwamy wybrane pręty, wskazując je na planie lub w tabeli i wciskając klawisz *Delete* na klawiaturze. Oczywiście po każdej zmianie należy ponownie dokonać weryfikacji zbrojenia.

14. Rysunki zbrojenia

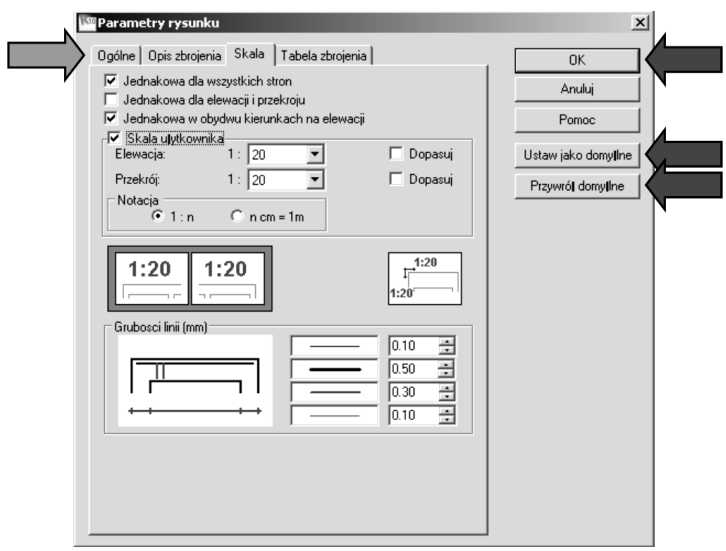
Po ostatecznym zaakceptowaniu rozmieszczenia zbrojenia w płycie możemy skorzystać z możliwości automatycznego utworzenia rysunków wykonawczych (***Rezultaty → Rysunki***). W naszym przypadku zostaną utworzone takie rysunki, jak Deskowanie płyty:



Zbrojenie dolne płyty (wkładki rysowane linią ciągłą), Zbrojenie górne płyty (wkładki rysowane linią przerywaną):



i Zestawienie zbrojenia. Wybrane parametry rysunku możemy ustalić w oknie dialogowym *Parametry rysunku* (***Analiza → Parametry rysunku...***). W jego kolejnych zakładkach definiujemy, jaki szablon rysunku zostanie użyty, tryb tworzenia i jednostki rysunku (*Ogólne*), sposób prezentowania i opisywania zbrojenia na planach zbrojenia (*Opis zbrojenia*), używane skale i grubości linii (*Skala*), sposób prezentacji i opisywania zbrojenia na zestawieniu prętów zbrojeniowych (*Tabela zbrojenia*). Jak zwykle wprowadzone zmiany akceptujemy za pomocą przycisku *OK*. Wprowadzone zmiany parametrów definiujących rysunek standardowo odnoszą się jedynie do bieżąco opracowywanej grupy rysunków (bieżąco opracowywanego elementu konstrukcji). Jeżeli chcemy wprowadzić je na stałe do szablonu, winniśmy użyć przycisku *Ustaw jako domyślne*:

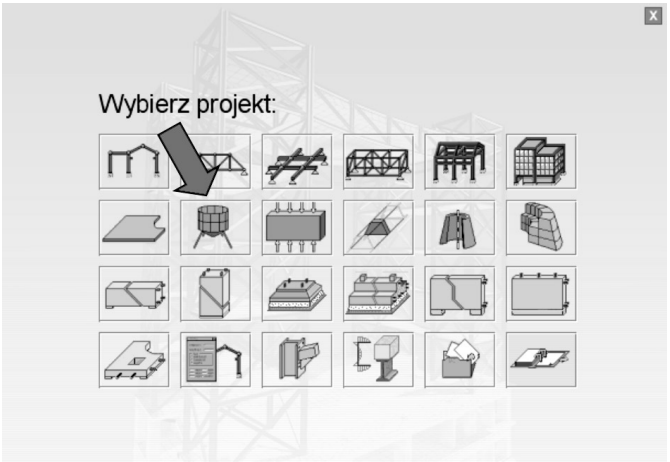


Ćwiczenie 6
Konstrukcja żelbetowa 3D

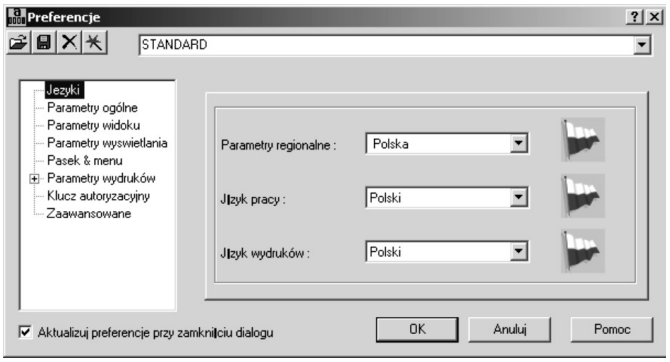
Nowe polecenia: Płaszczyzna pracy, Offset, Obciążenia powierzchniowe, Parametry zbrojenia, Wymiarowanie elementów żelbetowych, Rozmieszczenie i modyfikacja zbrojenia

1. Konfiguracja programu

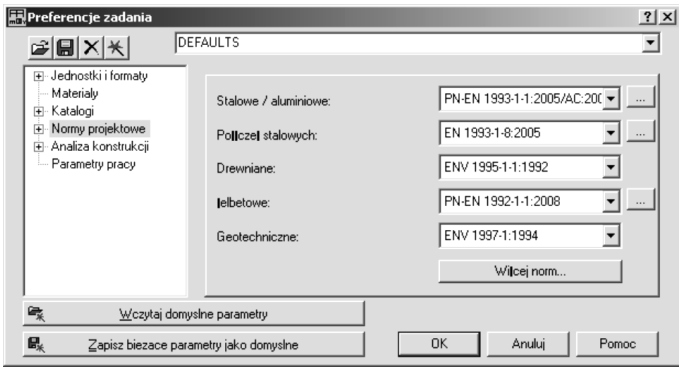
Wybieramy typ zadania – projektowanie powłoki



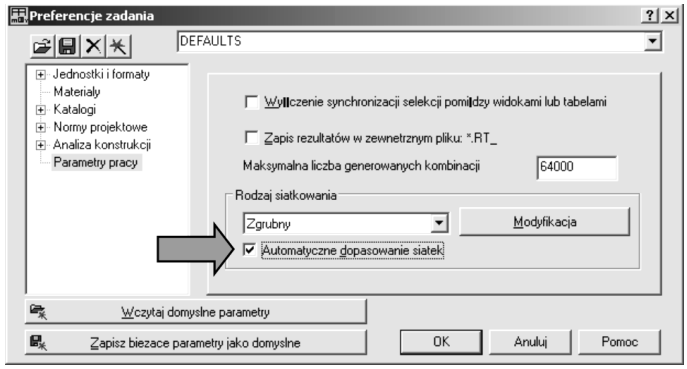
weryfikujemy ustawienia regionalne (***Narzędzia → Preferencje***):



ustalamy parametry projektu (***Narzędzia → Preferencje zadania***), sprawdzając czy w grupie *Normy projektowe* zostały ustawione aktualnie obowiązujące w Polsce normy:



ponadto w grupie *Parametry pracy* włączamy opcję **Automatyczne dopasowanie siatek**:



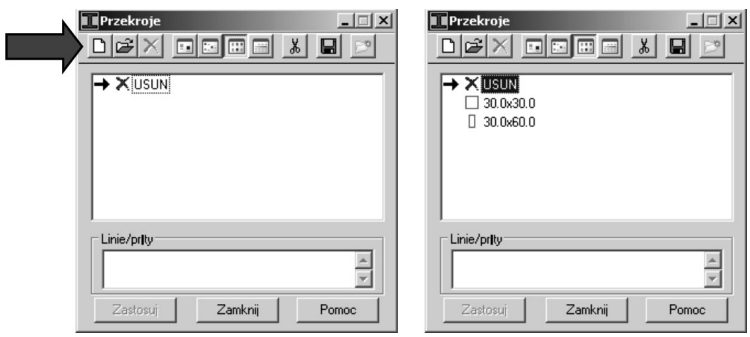
2. Osie konstrukcji

Osie konstrukcji (***Geometria → Osie konstrukcji***) wprowadzamy następująco:

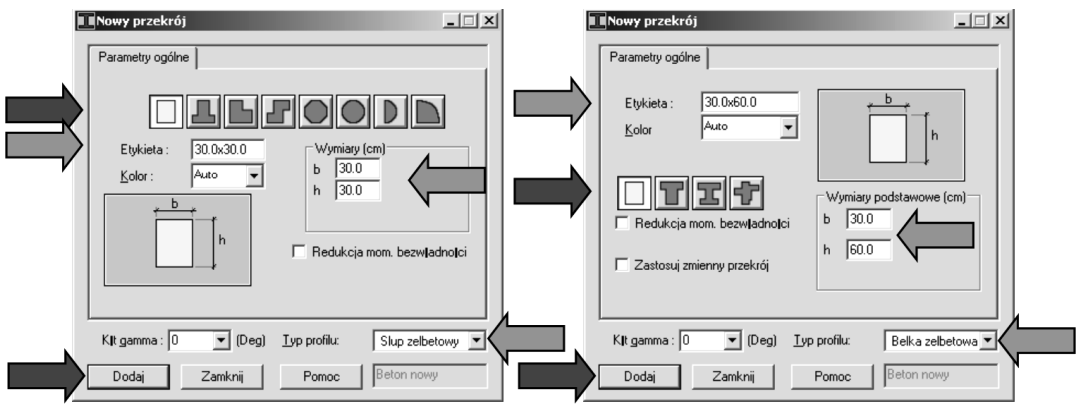
– w kierunku ***X*** : –1,00; 0,00; 7,00; 14,00; 15,00 m; styl numeracji A, B, C, ...
– w kierunku ***Y*** : 0,00; 7,00; 14,00 m, styl numeracji *Definiuj* L1, L2, L3
– w kierunku ***Z*** : 0,00; 4,00; 7,00; 8,00; 9,00 m; styl numeracji 1, 2, 3, ...

3. Geometria przekroju

Wprowadzamy przekroje używane w naszej konstrukcji (***Geometria → Charakterystyki → Profile prętów...***). Po otwarciu okna dialogowego *Przekroje*, przez wciśnięcie symbolu kartki papieru otwieramy okno dialogowe definicji nowego przekroju *Nowy przekrój*:

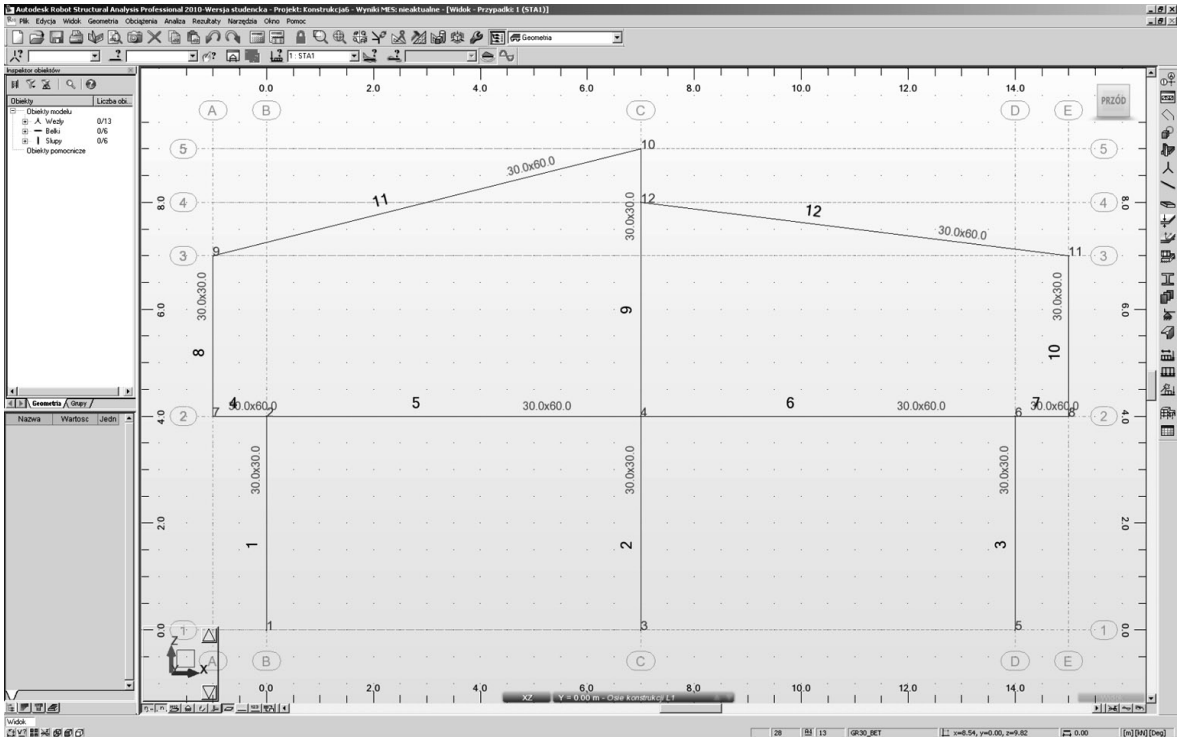


Na liście *Typ profilu* wybieramy **Słup żelbetowy**, w oknie przekrojów wskazujemy przekrój prostokątny, a w polu wymiarów wpisujemy b = **30,0**, h = **30,0**. W polu etykieta pozostawiamy wpis **30,0 × 30,0** i zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*. Następnie na liście *Typ profilu* wybieramy *Belka żelbetowa*, w oknie przekrojów wskazujemy przekrój prostokątny, a w polu wymiarów wpisujemy b = **30,0**, h = **60,0**. W polu etykieta pozostawiamy wpis **30,0 × 60,0** i zatwierdzamy przyciskiem *Dodaj*.

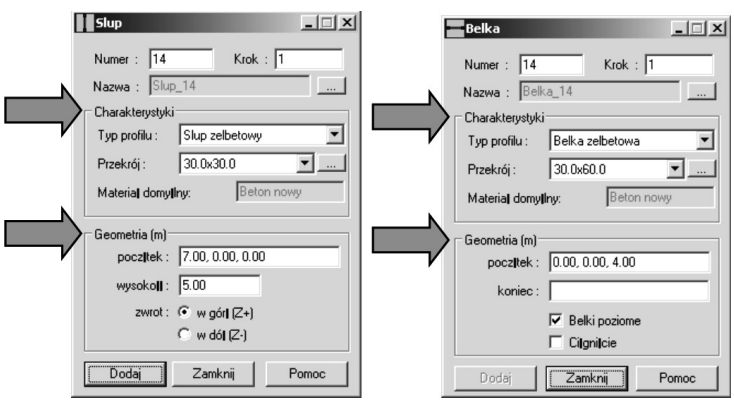


Po wykonaniu tych operacji okno dialogowe *Przekroje* powinno wyglądać jak powyżej po prawej.

4. Geometria konstrukcji



Korzystając z osi konstrukcyjnych określonych w punkcie 2, wprowadzamy konstrukcję o geometrii przedstawionej na powyższym rysunku. W tym celu skorzystamy z okien dialogowych *Słup* (***Geometria → Słup...***) i *Belka* (***Geometria → Belki...***). Po otwarciu okna dialogowego *Słup* w grupie *Charakterystyki* wybieramy **Słup żelbetowy** jako *Typ profilu* i **30,0 × 30,0** jako *Przekrój*. Zwracamy uwagę na to, żeby w grupie *Geometria* właściwie ustalić wysokość słupa, w zależności od kondygnacji ramy (4 metry na pierwszej kondygnacji i 3 lub 5 metrów na drugiej kondygnacji). Słupy wprowadzamy, wskazując myszą położenie dolnego końca. Po wprowadzeniu wszystkich słupów otwieramy okno dialogowe *Belka*, w którym w grupie *Charakterystyki* wybieramy **Belka żelbetowa** jako *Typ profilu* i **30,0 × 60,0** jako *Przekrój*. Dla przyspieszenia pracy możemy po narysowaniu pierwszej belki na kondygnacji włączyć opcję **Ciągnięcie**. Pamiętamy również, aby przed wprowadzeniem belek ukośnych nad drugą kondygnacją wyłączyć opcję *Belki poziome*.



5. Podpory

Konstrukcja jest utwierdzona w węzłach leżących na osi 1–1 (1, 3, 5 według numeracji z rysunku powyżej) (***Geometria → Podpory...***).

6. Obciążenia

Definiujemy sześć przypadków obciążenia: ciężarem własnym (***STA1***), obciążeniem stałym (***STA2***), obciążeniem eksploatacyjnym (***EKSP1*** i ***EKSP2***), wiatrem (***WIATR1***) i śniegiem (***SN1***) (***Obciążenia → Przypadki...***). Po ich zdefiniowaniu okno dialogowe *Przypadki obciążeń* winno wyglądać jak poniżej:

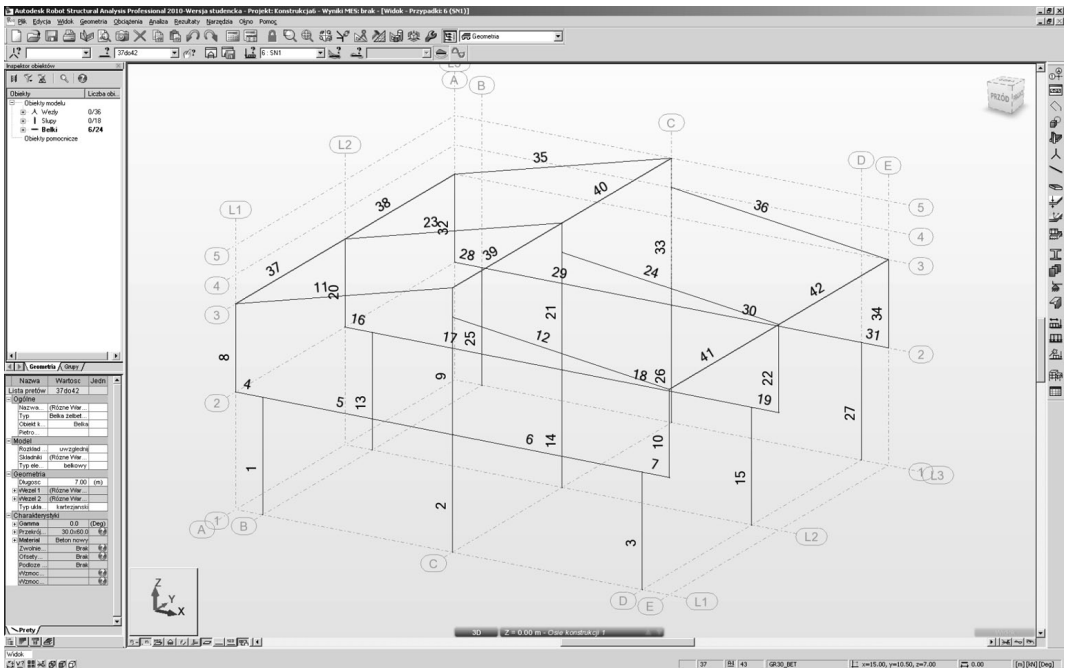
W drugiej kolejności definiujemy obciążenia dla określonych wcześniej przypadków obciążeń (***Obciążenia → Definicja obciążeń...***). Równomierne obciążenie stałe ***STA2*** o intensywności **–10,0** kN/m w kierunku osi ***Z*** globalnego układu współrzędnych jest przyłożone do belek 4, 5, 6, 7. Obciążenie użytkowe ***EKSP1*** o wartości **–20,0** kN jest przyłożone w środku rozpiętości belki 5, a obciążenie użytkowe ***EKSP2*** o wartości **–30,0** kN jest przyłożone w środku rozpiętości belki 6. Obydwa obciążenia działają w kierunku osi ***Z*** globalnego układu współrzędnych. Równomierne obciążenie wiatrem ***WIATR1*** o intensywności **–1,5** kN/m działa w kierunku osi ***z*** lokalnego układu współrzędnych pręta 1, **–2,5** kN/m działa w kierunku osi ***z*** lokalnego układu współrzędnych pręta 8 i **–3,0** kN/m działa w kierunku osi ***z*** lokalnego układu współrzędnych pręta 11. Rzutowane obciążenie śniegiem ***SN1*** o intensywności **–2,5** kN/m działa na jednostkę długości rzutu poziomego prętów 11 i 12.

7. Kopiowanie ramy płaskiej

Korzystając z opcji kopiowania (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***), kopiujemy ramę płaską dwukrotnie z wektorem przesunięcia **0,00**; **7,00**; **0,00**, tak aby w widoku trójwymiarowym (***Widok → Rzutowanie → 3d xyz***) uzyskać konstrukcję jak na poniższym rysunku.

8. Definicja belek podłużnych

Definiujemy żelbetowe belki podłużne (***Geometria → Belki...***) o wymiarach takich jak poprzednio w osiach 3 i 5 jak na rysunku powyżej (elementy o numerach od 37 do 42).

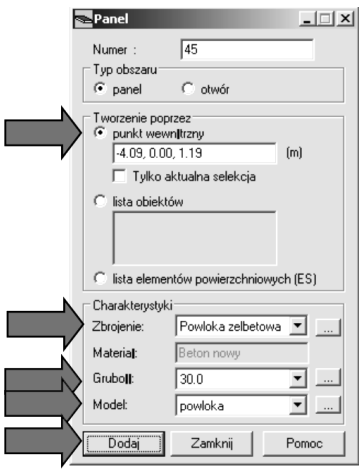


9. Definicja płyty

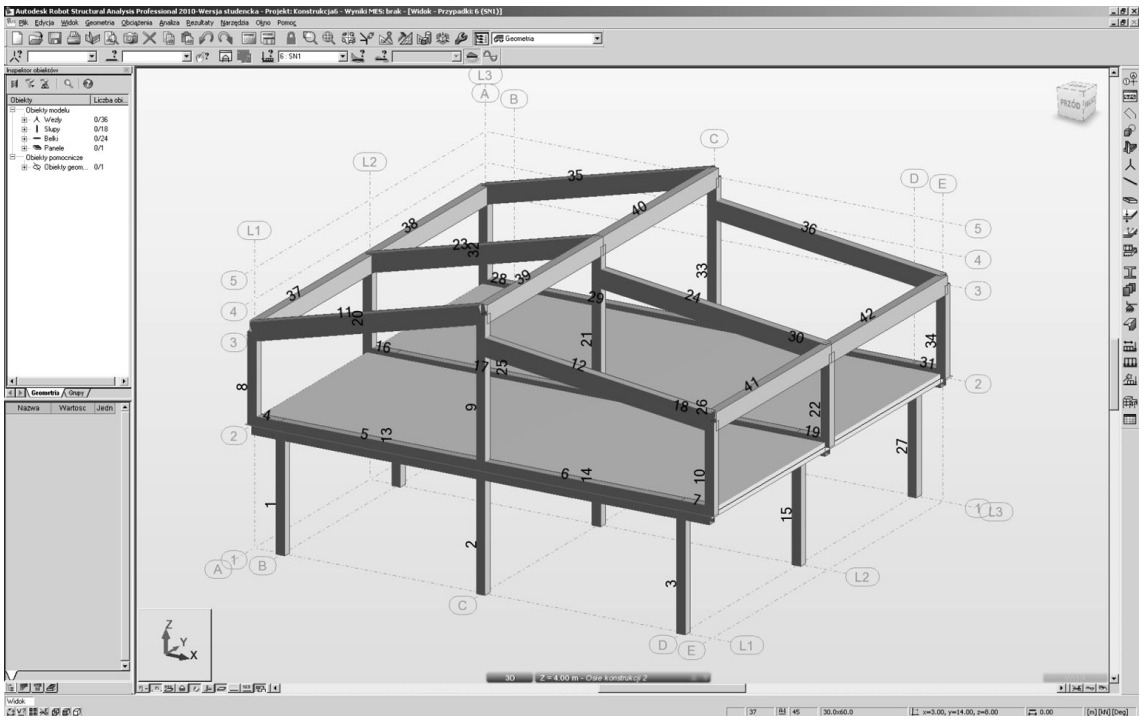
Dla ułatwienia ustalimy globalną płaszczyznę pracy na poziomie ***Z*** = +4,00 m. W tym celu klikamy w ikonę układu współrzędnych w lewym dolnym rogu ekranu. W oknie dialogowym *Widok*, które się pojawi ustalamy widok **2D** płaszczyzny ***XY*** na poziomie **4,00** m:

Wprowadzamy zarys konturu płyty (***Geometria → Obiekty → Polilinia – kontur...***). W celu wprowadzenia konturu w oknie dialogowym *Polilinia – kontur*:

pozostawiamy metodę tworzenia *Kontur* i naciskamy przycisk *Geometria*. W dolnej (otwartej po przyciśnięciu przycisku *Geometria*) części okna podajemy współrzędne kolejnych wierzchołków konturu: (**–1,00, 0,00; 15,00, 0,00; 15,00, 15,00; 0,00, 15,00; –1,00, 0,00**) i zamykamy okno definicji konturu przyciskiem *Zamknij*. W oknie dialogowym definicji panelu (***Geometria → Panele...***):

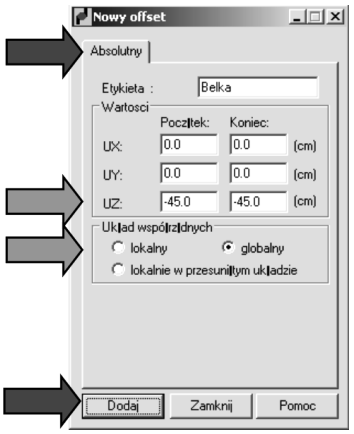


w grupie *Charakterystyki* wybieramy *Zbrojenie* **Strop żelbetowy**, *Grubość* **30,0** i *Model* obliczeniowy **Powłoka**. Gdyby na liście nie było grubości 30,0, to należy ją zdefiniować, klikając przycisk (...) i wprowadzając niezbędne dane w oknie dialogowym *Nowa grubość* (*Ćwiczenie 5*). Następnie wskazujemy dowolny punkt wewnątrz utworzonej wcześniej polilinii i akceptujemy wybór przyciskiem *Dodaj*. Zamykamy okno *Panel* przyciskiem *Zamknij*. Po wykonaniu opisanych powyżej czynności, przejściu do widoku trójwymiarowego i włączeniu widoczności grubości profili konstrukcja powinna wyglądać następująco:

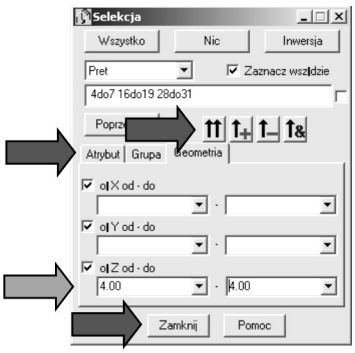


10. Definicja offsetów

Zdefiniujemy nowe przesunięcie osi belki (offset) tak, aby belki stropu nad pierwszą kondygnacją znajdowały się pod płytą. W tym celu otwieramy okno dialogowe *Offset* (***Geometria → Cechy dodatkowe → Offsety...***) i przez wciśnięcie symbolu kartki papieru otworzymy okno dialogowe definicji nowego offsetu *Nowy offset*:



Na zakładce *Absolutny* definiujemy w globalnym układzie współrzędnych offset o wartości 45 cm (połowa grubości płyty i połowa wysokości belki), nadając mu nazwę *Belka*. Używając ikony wyboru prętów (***Edycja → Zaznacz...***), otwieramy okno *Selekcja*, w którym dokonamy wyboru prętów do nadania offsetu:

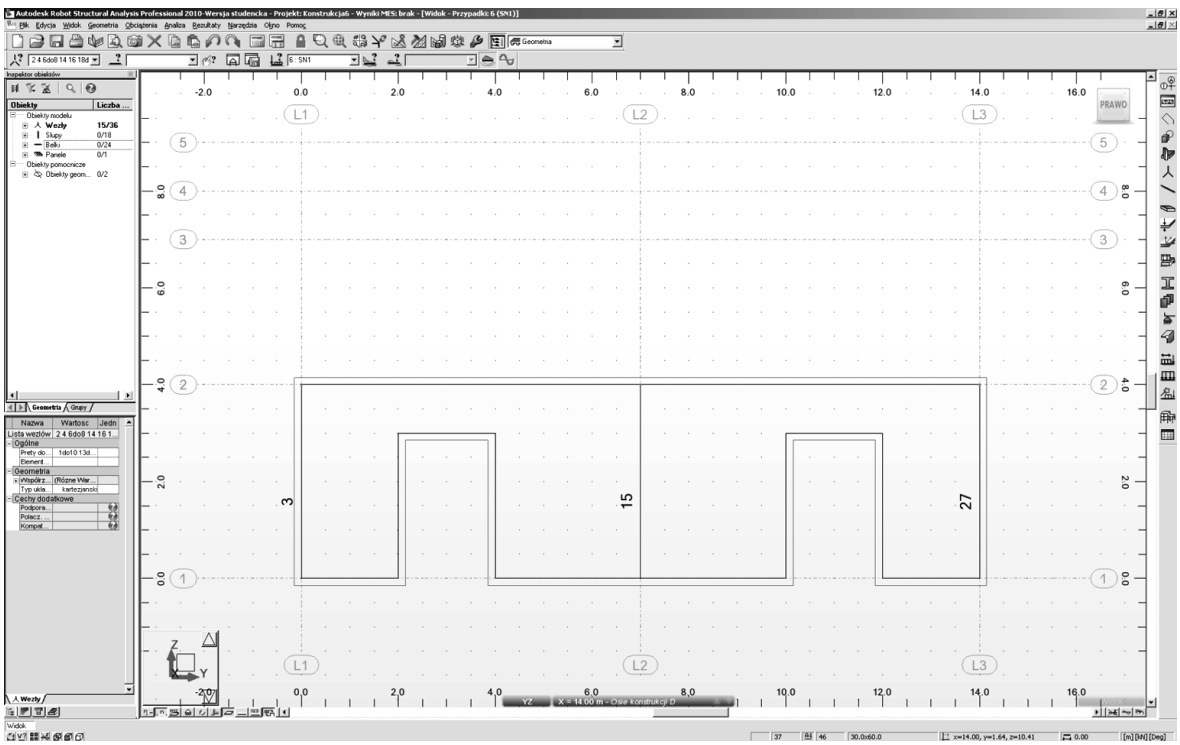


W tym celu na zakładce *Geometria* z list rozwijalnych wybierzemy *oś Z od* **4,00** *do* **4,00**, następnie wciśniemy przycisk opatrzony symbolem podwójnej strzałki. W rezultacie powinny zostać zaznaczone wszystkie belki poziome naszej konstrukcji leżące w poziomie stropu pierwszej kondygnacji (o numerach od 4 do 7, od 16 do 19 i od 28 do 31). Następnie ukrywamy okno *Selekcja* przyciskiem *Zamknij*, a w oknie *Offset* klikamy myszą w pole *Aktualna selekcja*. W rezultacie numery prętów spełniających kryterium wyboru winny zostać wpisane do tego pola. Aby nałożyć pożądany offset na wybrane pręty, wybieramy go z listy i wciskamy przycisk *Zastosuj*:

11. Definicja ściany

Definiujemy globalną płaszczyznę pracy jako płaszczyznę *YZ* w odległości 14,00 m od początku globalnego układu współrzędnych. W tym celu, podobnie jak poprzednio, klikamy w ikonę układu współrzędnych w lewym dolnym rogu ekranu. W oknie dialogowym *Widok*, które się pojawi ustalamy widok **2D** płaszczyzny ***YZ*** w odległości **14,00** m:

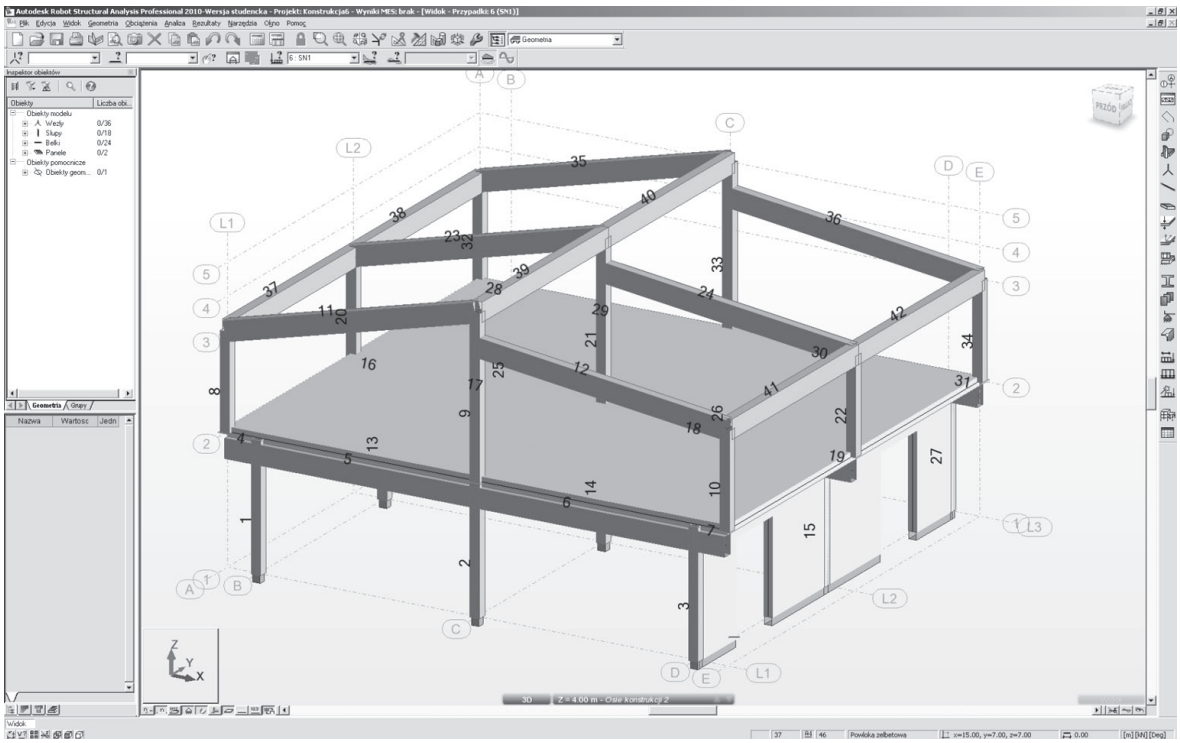
W tej płaszczyźnie definiujemy polilinię przechodzącą przez następujące punkty: (**0,00**, **0,00**; **2,00**, **0,00**; **2,00**, **3,00**; **4,00**, **3,00**; **4,00**, **0,00**; **10,00**, **0,00**; **10,00**, **3,00**; **12,00**, **3,00**; **12,00**, **0,00**; **14,00**, **0,00**; **14,00**, **4,00**; **0,00**, **4,00**) (***Geometria → Obiekty → Polilinia – kontur...***). Po wykonaniu polecenia konstrukcja powinna wyglądać następująco:



W oknie dialogowym definicji panelu (***Geometria → Panele...***) w grupie *Charakterystyki* wybieramy *Zbrojenie* **Ściana żelbetowa**, *Grubość* **30,0** i *Model* obliczeniowy **Powłoka**. Następnie wskazujemy dowolny punkt wewnątrz utworzonej wcześniej polilinii i akceptujemy wybór przyciskiem *Dodaj*. Zamykamy okno *Panel* przyciskiem *Zamknij*.

Na dolnej krawędzi ściany na zakładce *Liniowe* narzucamy podporę w postaci utwierdzenia (***Geometria → Podpory...***).

Po zdefiniowaniu geometrii i ustawieniu odpowiednich atrybutów widoczności (grubości paneli, offsety, podpory) konstrukcja powinna wyglądać następująco (***Widok → Rzutowanie → 3d xyz***):



12. Obciążenia

Do zdefiniowanych wcześniej sześciu przypadków obciążenia dodajemy trzecie obciążenie eksploatacyjne (***EKSP3***), równomiernie rozłożone na całej powierzchni stropu, działające w kierunku osi ***Z*** globalnego układu współrzędnych, o intensywności **–10,0** kN/m^2.

Po określeniu wszystkich obciążeń weryfikujemy poprawność ich definicji w tabeli obciążeń (***Widok → Tabele...***). Stosowna tabela winna wyglądać następująco:

	Przypadek	Typ obciazenia	Lista																	
	1:STA1	ciezar wlasny	1do42 44	Cala kons	-Z	Wsp=1.00	MEMO :													
	2:STA2	obciaz. jednorodne	4do7 16do	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-10.00	globalny	nierzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :					
	3:EKSP1	sila pretowa	5 17 29	FX=0.0	FY=0.0	FZ=-20.00	CX=0.0	CY=0.0	CZ=0.0	X=0.50	globalny	wzgledn	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	wezel	MEMO :	
	4:EKSP2	sila pretowa	6 18 30	FX=0.0	FY=0.0	FZ=-30.00	CX=0.0	CY=0.0	CZ=0.0	X=0.50	globalny	wzgledn	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	wezel	MEMO :	
	5:WATR1	obciaz. jednorodne	1 13 25	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-1.50	lokalny	nierzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :					
	5:WATR1	obciaz. jednorodne	8 20 32	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-2.50	lokalny	nierzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :					
	5:WATR1	obciaz. jednorodne	11 23 35	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-3.00	lokalny	nierzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :					
	6:SN1	obciaz. jednorodne	11 12 23 2	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-2.50	globalny	rzutowane	absolutne	AL=0.0	BE=0.0	GA=0.0	DY=0.0	DZ=0.0	MEMO :					
	7:EKSP3	(ES) jednorodne	44	PX=0.0	PY=0.0	PZ=-10.00	globalny	nierzutowane	absolutne	Ograniczenia	MEMO :									
*																				

13. Siatka obliczeniowa MES

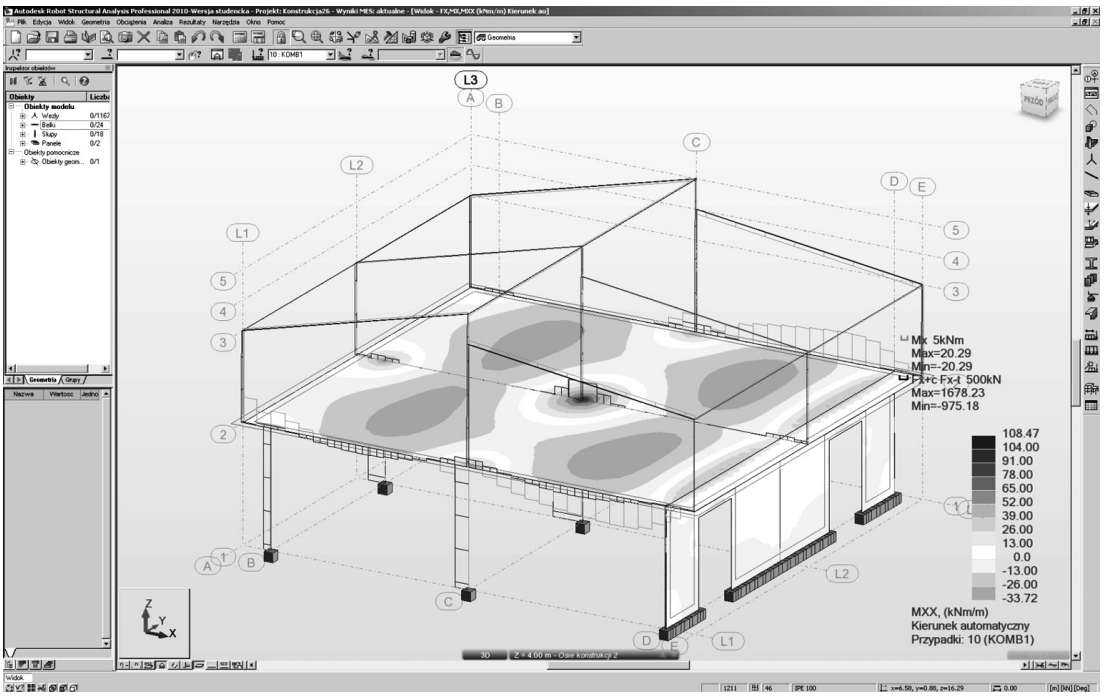
Przed przystąpieniem do ustalania opcji siatkowania sprawdzamy, czy przypadkiem nie został wybrany któryś z paneli. Jeżeli tak, to należy usunąć selekcję. Parametry generacji siatki MES na powierzchni paneli w oknie *Opcje siatkowania* (***Analiza → Model obliczeniowy → Opcje siatkowania...***) ustalamy następująco: **siatkowanie złożone (Delaunay)** i rozmiar elementu równy **0,50** m. Następnie uruchamiamy generację siatki (***Analiza → Model obliczeniowy → Generacja***). Utworzoną siatkę możemy zamrozić (***Analiza → Model obliczeniowy → Zamrożenie siatki***), aby uniknąć przypadkowej jej modyfikacji.

14. Obliczenia

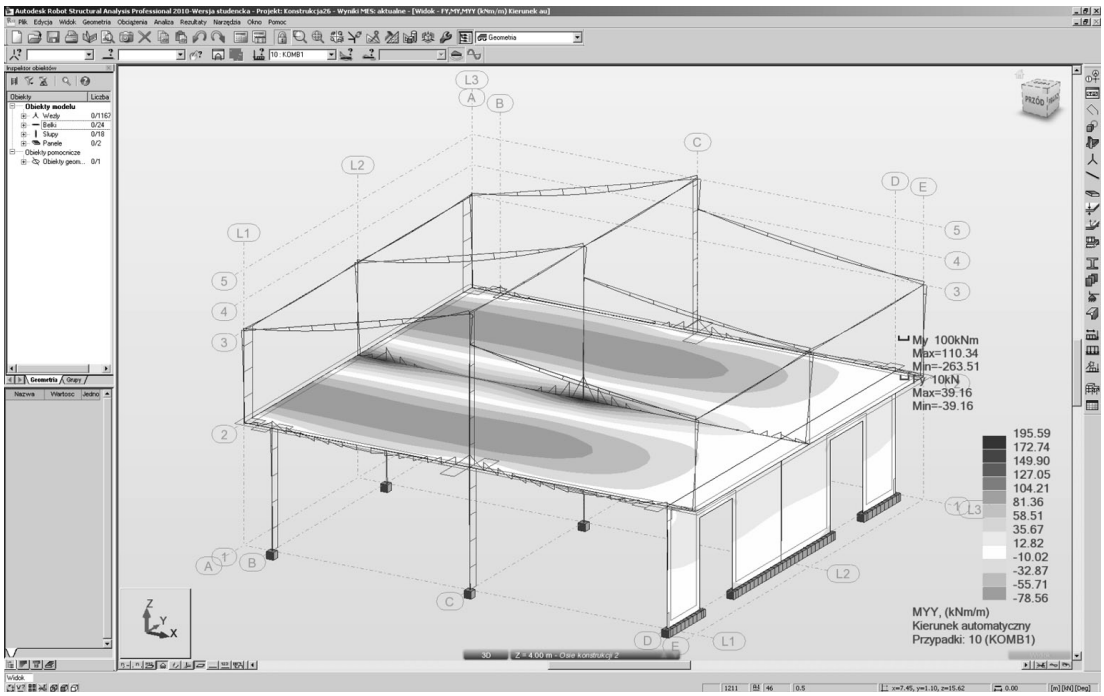
Definiujemy dwie kombinacje (***Obciążenia → Kombinacje ręczne...***), w skład których wchodzą wszystkie obciążenia przyłożone do naszej konstrukcji z normowymi mnożnikami wynikającymi z ich natury. Utworzymy jedną kombinację Stanu Granicznego Nośności (***KOMB1***) i jedną kombinację Stanu Granicznego Użytkowania (***KOMB2***). Dla tak zdefiniowanych kombinacji dokonujemy analizy konstrukcji.

15. Prezentacja wyników

Wykorzystując polecenia poznane w trakcie wcześniejszych zajęć, możemy dokonać wizualizacji stanu naprężenia i przemieszczenia w konstrukcji będącego skutkiem przyłożonych obciążeń. I tak na przykład wartości momentu M_{xx} w panelach i M_x oraz N_x w prętach konstrukcji wyglądają następująco:



a momentu M_{yy} w panelach i M_y oraz N_y w prętach konstrukcji następująco:

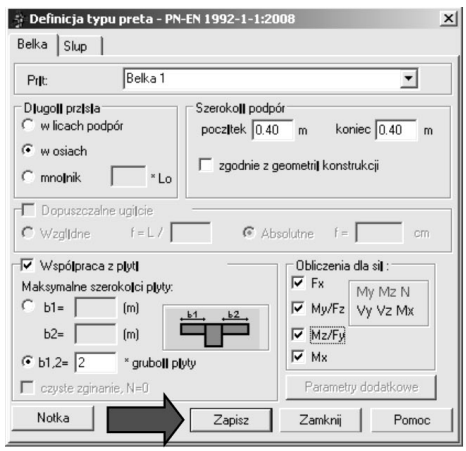


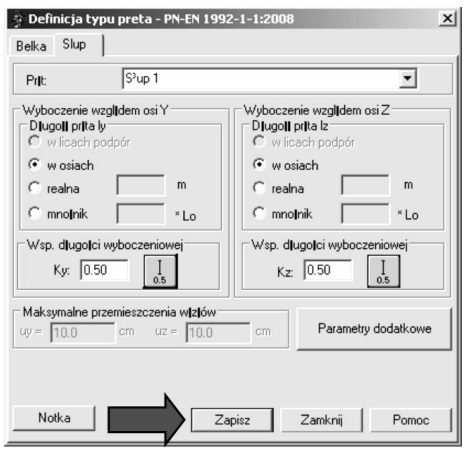
16. Zbrojenie

Dokonamy obliczeń zbrojenia dla następujących elementów konstrukcji: belki poziomej ramy centralnej, belki ukośnej ramy centralnej, centralnego słupa konstrukcji, płyty oraz ściany. W każdym przypadku jako wymiarujące potraktujemy kombinacje zdefiniowane przez nas w punkcie 14.

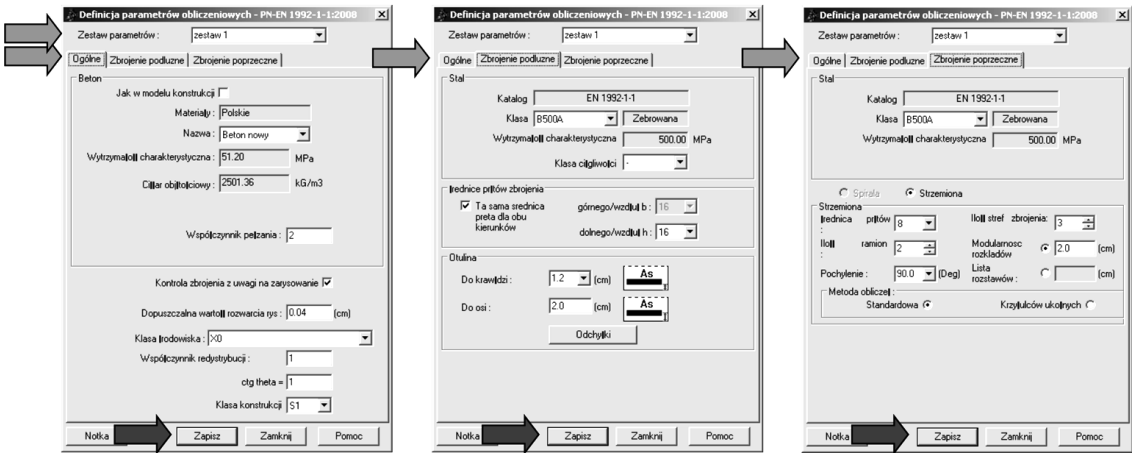
Jednak przed przystąpieniem do właściwych obliczeń dokonamy modyfikacji wartości wybranych parametrów rozkładu zbrojenia. I tak zdefiniujemy nowy typ zbrojenia dla płyty, o nazwie *Płyta* (***Geometria → Parametry normowe → Typ zbrojenia płyt i powłok...*** i wciskamy symbol kartki papieru, aby otworzyć okno dialogowe *Parametry zbrojenia*), w którym określimy rozwartość rys *wk* równą **0,3** mm (*Parametry SGU*), grubość otuliny **1,5** cm (*Zbrojenie*) oraz zweryfikujemy poprawność przyjęcia materiałów konstrukcyjnych: betonu (**Beton nowy**) i stali zbrojeniowej (**żebrowana**) (*Materiały*). W ten sam sposób i z takimi samymi parametrami zdefiniujemy nowy typ zbrojenia dla ściany, o nazwie *Ściana*. Następnie te typy zbrojenia przypiszemy odpowiednio do płyty i ściany (***Geometria → Parametry normowe → Typ zbrojenia płyt i powłok...***), wpisując w okno *Panele* numer panelu odpowiadający elementowi konstrukcji, z listy wybierając uprzednio zdefiniowany typ zbrojenia i akceptując wybór przyciskiem *Zastosuj*.

Podobnie zdefiniujemy dwa nowe typy prętów betonowych o nazwach *Słup 1* i *Belka 1* (***Geometria → Parametry normowe → Typ pręta betonowego...***). Tak jak poprzednio, aby otworzyć okno *Definicja typu pręta* wciskamy symbol kartki papieru. W oknie *Definicja typu pręta* dla belki ustalamy *Długość przęsła* mierzoną w **osiach**, *Współpracę z płytą* – maksymalna szerokość współpracująca płyty równa **dwóm** grubościom płyty, *Obliczenia dla sił* – **komplet**. Wprowadzone zmiany akceptujemy przyciskiem *Zapisz*. Dla słupa ustalimy długości wyboczeniowe w kierunkach *y* i *z* w układzie lokalnym, wprowadzając informacje o sposobie wyznaczania długości wyboczeniowej K = **0,50** i warunkach podparcia obydwu końców (utwierdzenie). Wprowadzone zmiany akceptujemy przyciskiem *Zapisz*. Następnie nowo zdefiniowane typy prętów przypisujemy wszystkim słupom i belkom konstrukcji w oknie dialogowym *Typy prętów betonowych*, korzystając z okna *Inspektora obiektów*.

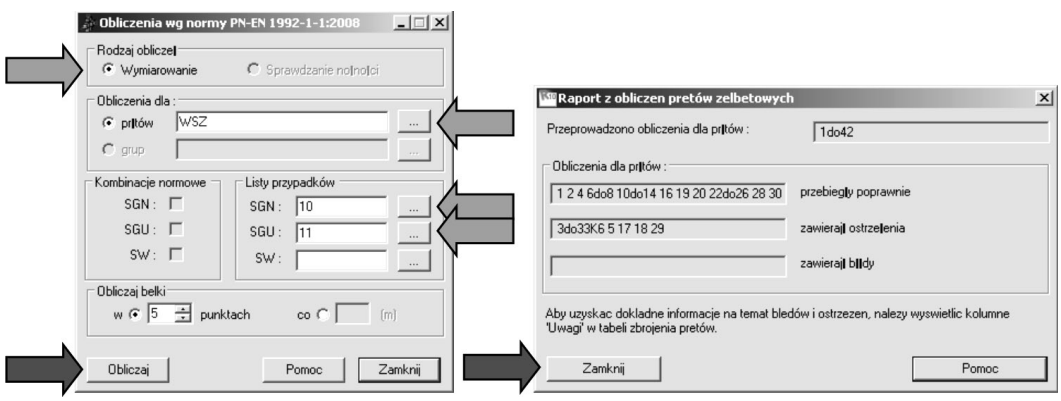




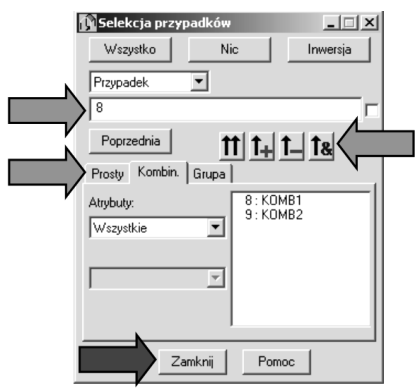
Przed przystąpieniem do obliczeń zbrojenia dla elementów prętowych powinniśmy jeszcze ustalić parametry obliczeniowe w oknie *Definicja parametrów obliczeniowych* (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie prętów żelbetowych → Parametry obliczeniowe...***). W kolejnych zakładkach tego okna ustalamy własności materiału i środowiska (*Ogólne*), klasę, średnicę i otulinę prętów zbrojenia głównego (*Zbrojenie podłużne*), klasę, średnicę i sposób rozmieszczania (liczba stref) strzemion (*Zbrojenie poprzeczne*) tak jak na rysunkach załączonych poniżej. W oknie *Zestaw parametrów* wprowadzamy nazwę *Zestaw 1* i akceptujemy zmiany przyciskiem *Zapisz*.



Po wprowadzeniu wszystkich opisanych powyżej parametrów i własności zbrojenia możemy przejść do właściwego obliczania zbrojenia teoretycznego (wymaganego obliczeniowo) dla wszystkich prętów konstrukcji (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie prętów żelbetowych → Obliczenia...***). W oknie dialogowym *Obliczenia wg normy...*, które się wówczas pojawi ustalamy *Rodzaj obliczeń* (będzie to wymiarowanie), *Obliczenia dla* (podajemy listę prętów, dla których prowadzone będą obliczenia). W grupach *Kombinacje normowe* i *Listy przypadków* wprowadzamy numery przypadków obciążeniowych bądź ich kombinacji, dla których będą prowadzone obliczenia. Jeżeli kombinacje przypadków obciążeń tworzyliśmy ręcznie, to numery kombinacji wymiarujących musimy wprowadzić ręcznie do okien grupy *Listy przypadków*:

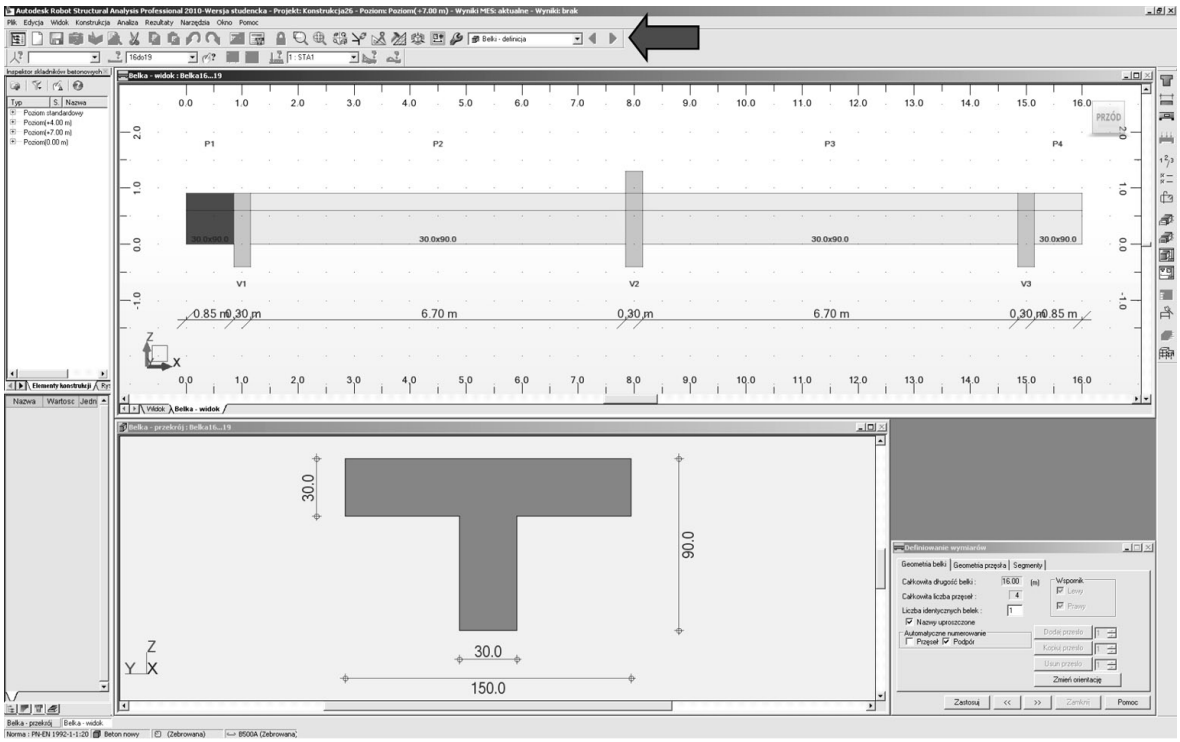


Możemy się w tym celu odwołać do okna *Selekcja przypadków*, dostępnego po naciśnięciu przycisku ... na wysokości okna SGN, SGU bądź SW (strzałka). W oknie tym spośród zakładek wybieramy *Kombin.*, zważając by na liście *Atrybuty* widniał wybór **Wszystkie**. Z dostępnej listy kombinacji na listę wyboru wprowadzamy **KOMB1** dla SGN i **KOMB2** dla SGU. Za każdym razem wybór zatwierdzamy przyciskiem *Zamknij*.

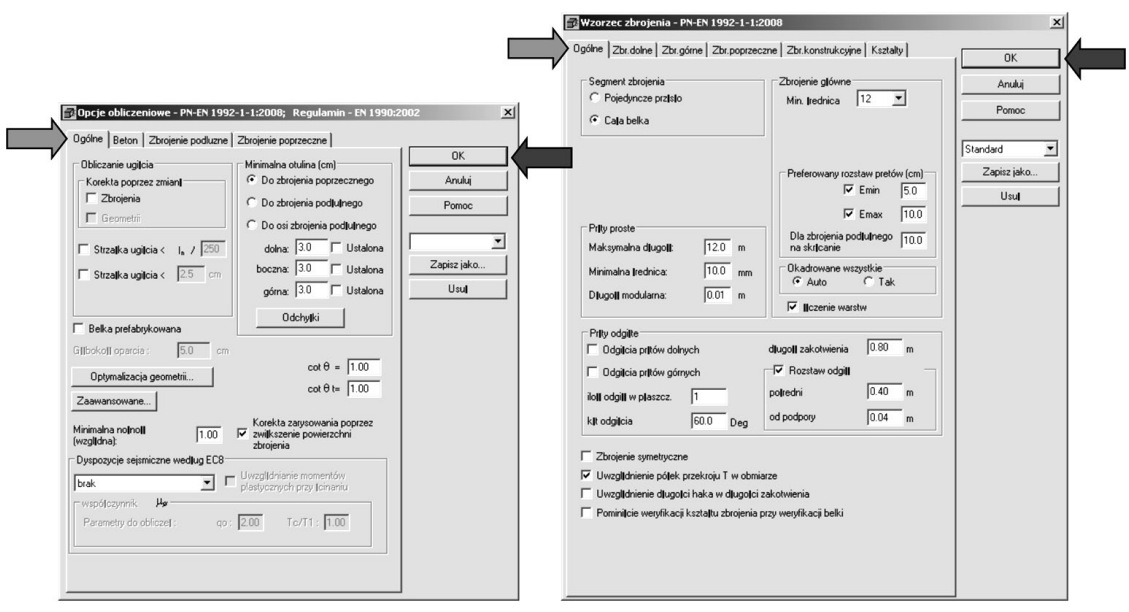


Po ustaleniu wszystkich parametrów w oknie *Obliczenia wg normy...* możemy przystąpić do obliczeń, używając przycisku *Obliczaj*. Po zakończeniu obliczeń dla prętów wskazanych w tym dialogu pojawi się okno *Raport z obliczeń prętów żelbetowych*, zawierający krótkie podsumowanie obliczeń (patrz powyżej). Zanim przystąpimy do dalszej pracy musimy je zamknąć przyciskiem *Zamknij*.

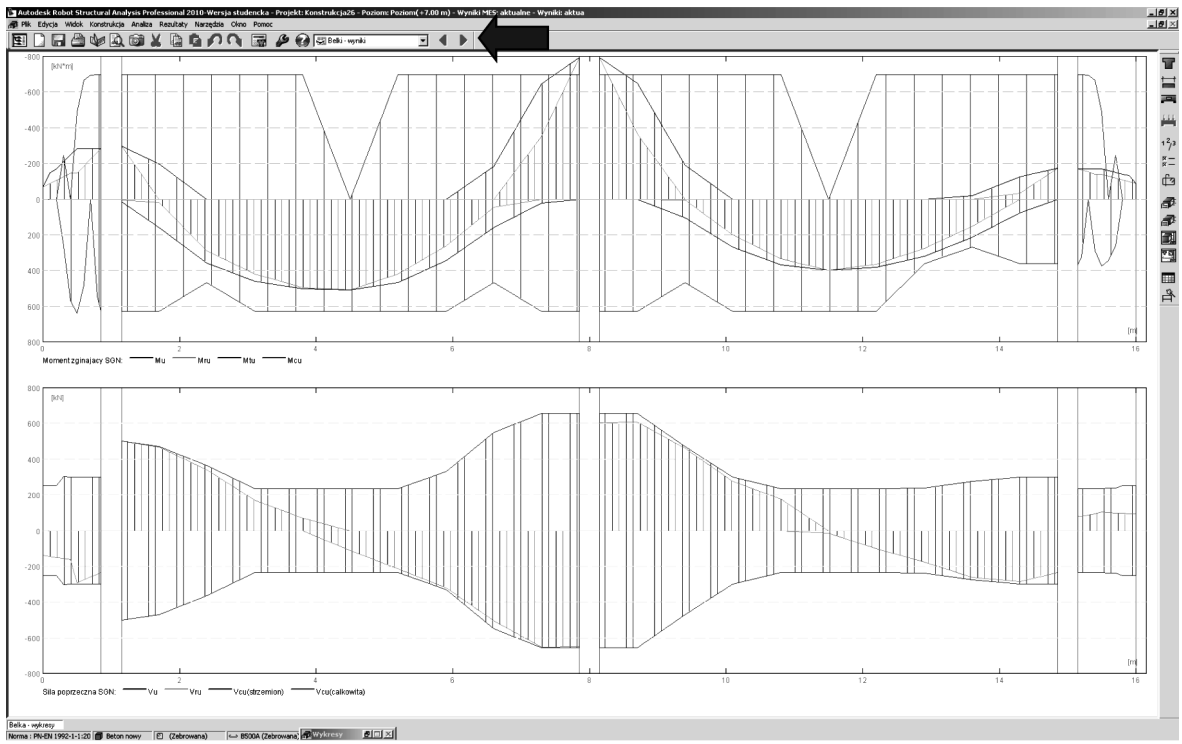
Belka pozioma



Przed przystąpieniem do wymiarowania belki żelbetowej wybieramy (np. w oknie *Inspektora obiektów* po lewej stronie głównego okna programu) listę prętów tworzących centralną belkę poziomą w stropie dolnej kondygnacji (elementy skończone od 16 do 19). Następnie przystępujemy do wymiarowania (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie belek żelbetowych***). W rezultacie zostanie otwarty ekran ***Belki – definicja***, w którym możemy zweryfikować poprawność przekazania parametrów geometrii belki z modułu obliczeniowego MES do modułu wymiarowania zbrojenia. Przed rozpoczęciem obliczeń zbrojenia rzeczywistego należy ustalić opcje obliczeniowe (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) i parametry zbrojenia (***Analiza → Parametry zbrojenia...***):

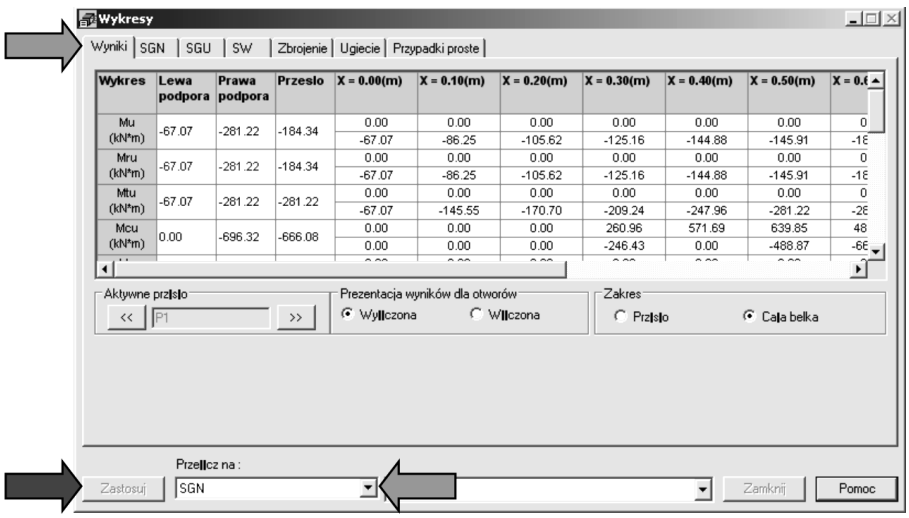


Na kolejnych zakładkach okna *Opcje obliczeniowe* możemy ustalić bądź zweryfikować: grubość otuliny, maksymalne wartości ugięć (*Ogólne*), parametry betonu zastosowanego w konstrukcji (*Beton*), klasę i dopuszczalne średnice prętów zbrojenia głównego (*Zbrojenie podłużne*), klasę i dopuszczalne średnice prętów zbrojenia poprzecznego (*Zbrojenie poprzeczne*). Na kolejnych zakładkach okna *Wzorzec zbrojenia* ustalamy wymiary prętów prostych i odgiętych (*Ogólne*), sposób rozmieszczania zbrojenia głównego w warstwach (*Zbr. dolne* i *Zbr. górne*), zasady rozmieszczania zbrojenia poprzecznego (*Zbr. poprzeczne*) i konstrukcyjnego, takiego jak haki montażowe czy zbrojenie przeciwskurczowe (*Zbr. konstrukcyjne*) oraz kształty prętów (*Kształty*). Po ustaleniu i weryfikacji sposobu zbrojenia uruchamiamy obliczenia zbrojenia rzeczywistego (***Analiza → Obliczenia...***). Jeżeli w trakcie obliczeń pojawią się problemy, odpowiedni komunikat znajdzie się w oknie *Błędy obliczeń*. Po wykonaniu obliczeń możemy przejść do ekranu ***Belki – wyniki***, na którym możemy obejrzeć obwiednię sił przekrojowych rzeczywiście występujących w konstrukcji oraz nośności konstrukcji obliczonej dla wyznaczonego rozkładu zbrojenia:



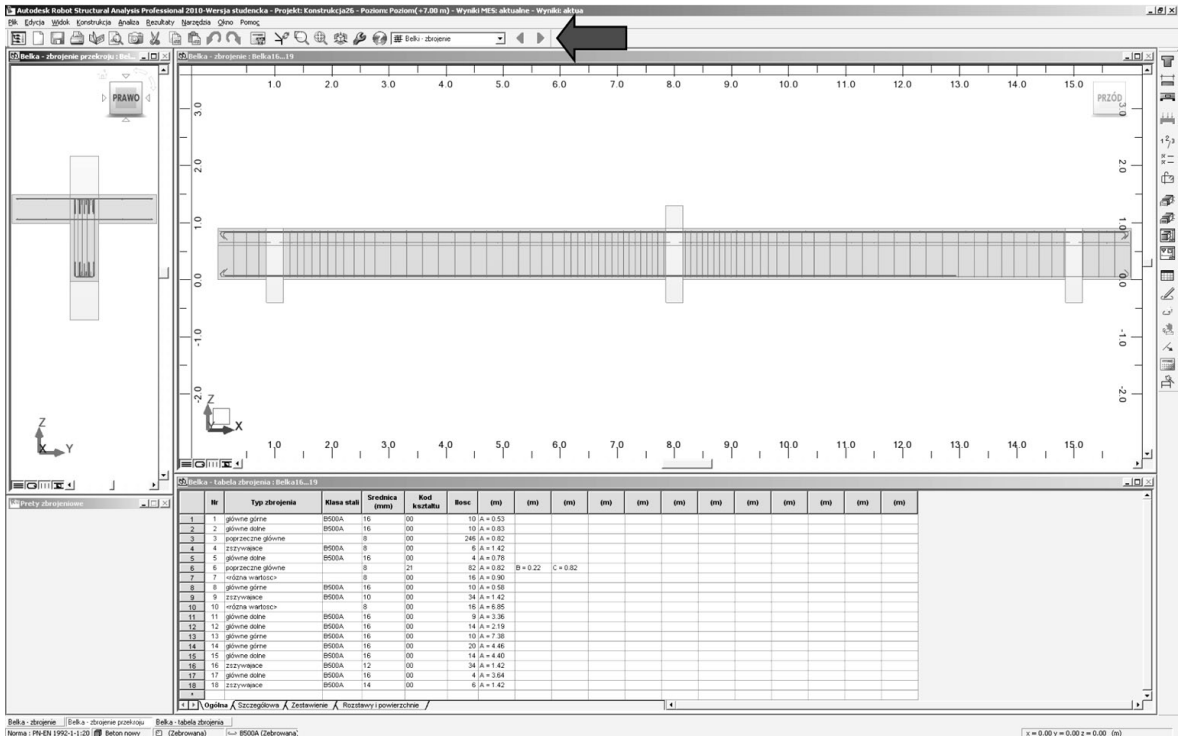
Przemieszczając w tym oknie kursor myszy nad dowolnym wykresem, możemy uzyskać odczyt wszystkich prezentowanych na wykresie wartości w punkcie o rzędnej wskazywanej przez kursor.

Parametry prezentacji tych wykresów ustalamy w oknie *Wykresy* (***Rezultaty → Wykresy...***):

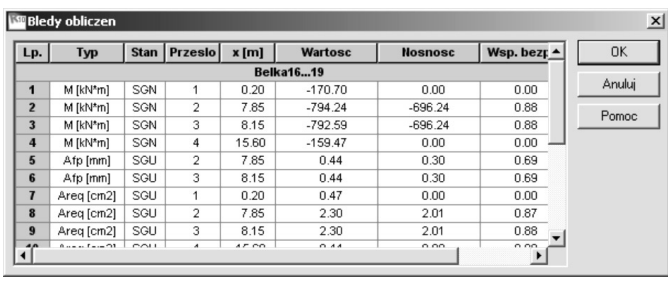


W tym samym oknie, na kolejnych zakładkach, możemy obejrzeć wyniki w postaci tabelarycznej i ustalić zakres geometryczny prezentacji (*Wyniki*) oraz wybrać, które wielkości będą prezentowane na kolejnych wykresach (*SGN*, *SGU*, *SW*, *Zbrojenie*, *Ugięcie*, *Przypadki proste*). Możemy też zmienić tryb prezentacji wykresów, korzystając z okna *Przełącz na*.

Po przejściu na ekran ***Belki – zbrojenie*** możemy zobaczyć rozmieszczenie zbrojenia w belce w widoku z boku i widoku czołowym oraz zestawienie prętów zbrojeniowych w postaci tabelarycznej. Tak jak w przypadku zbrojenia rozmieszczonego w płycie, po wskazaniu pręta bądź grupy prętów na rysunku (*Shift + lewy*) odpowiadające im wiersze tabeli zostaną podświetlone i na odwrót, jeżeli wskażemy wiersz lub wiersze w tabeli, odpowiadające im pręty zostaną podświetlone na czerwono na rysunku.

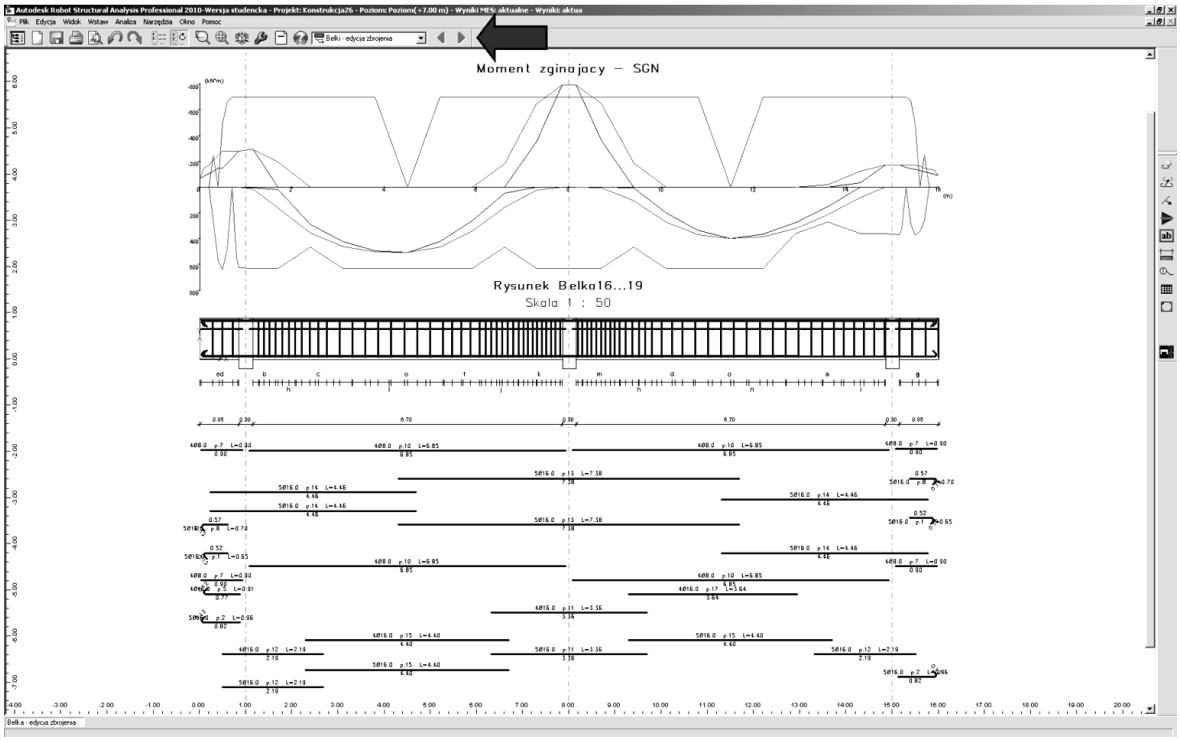


W razie potrzeby możemy usunąć zaznaczony pręt lub pręty, należy jednak pamiętać, aby w takim przypadku powtórzyć obliczenia zbrojenia i dokonać weryfikacji wyników (***Analiza → Weryfikacja***):



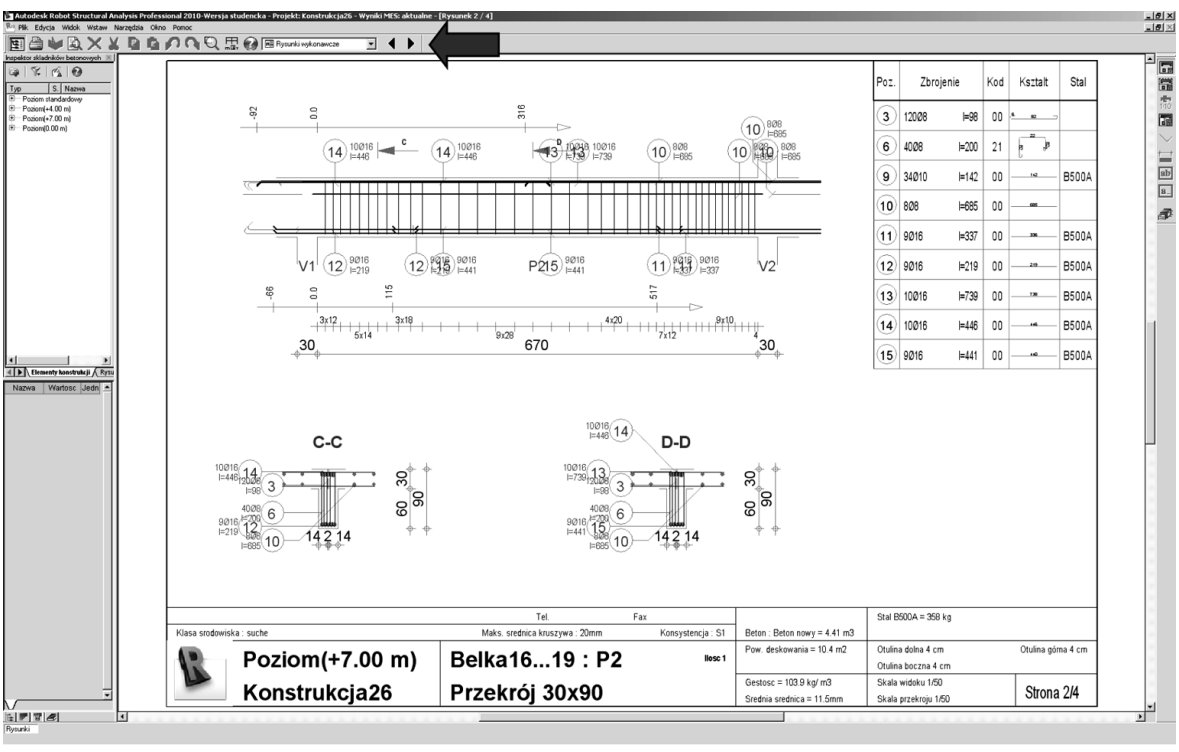
Lp.	Typ	Stan	Przeslo	x [m]	Wartosc	Nosnosc	Wsp. bezp
			Belka16...19				
1	M [kN*m]	SGN	1	0.20	-170.70	0.00	0.00
2	M [kN*m]	SGN	2	7.85	-794.24	-696.24	0.88
3	M [kN*m]	SGN	3	8.15	-792.59	-696.24	0.88
4	M [kN*m]	SGN	4	15.60	-159.47	0.00	0.00
5	Afp [mm]	SGU	2	7.85	0.44	0.30	0.69
6	Afp [mm]	SGU	3	8.15	0.44	0.30	0.69
7	Areq [cm2]	SGU	1	0.20	0.47	0.00	0.00
8	Areq [cm2]	SGU	2	7.85	2.30	2.01	0.87
9	Areq [cm2]	SGU	3	8.15	2.30	2.01	0.88

Po zamknięciu okna *Błędy obliczeń* możemy przejść na ekran ***Belki – edycja zbrojenia***. Na ekranie tym mamy możliwość dokonania korekty kształtu wkładek zbrojenia głównego w trybie graficznym. Aby dokonać korekty kształtu wkładki, należy wskazać ją kursorem myszy, następnie kliknąć na jeden z końców pręta i ciągnąc za koniec, przemieścić go na pożądaną odległość. Jeżeli chcemy przesunąć całą wkładkę bez zmiany długości, klikamy na punkt w środku długości pręta i przesuwamy go w pożądane położenie:



Na ekranie tym możemy również dodać pręty zbrojenia głównego, wskazując ich położenie na widoku belki myszą (***Wstaw → Pręt podłużny***). Poprawność umieszczenia pręta bądź prętów możemy zweryfikować natychmiast w oknie ***Belki – zbrojenie***. Zmiana kształtu i rozmieszczenia wkładek skutkuje oczywiście zmianą obwiedni nośności, która jest prezentowana w oknie automatycznie oraz koniecznością weryfikacji obliczeniowej zbrojenia.

Po zaakceptowaniu rozmieszczenia zbrojenia możemy przejść do tworzenia rysunków wykonawczych (***Rezultaty → Rysunki***). Opcja ta dostępna jest jedynie na ekranach: ***Belki – definicja***, ***Belki – wyniki***, ***Belki – zbrojenie***.

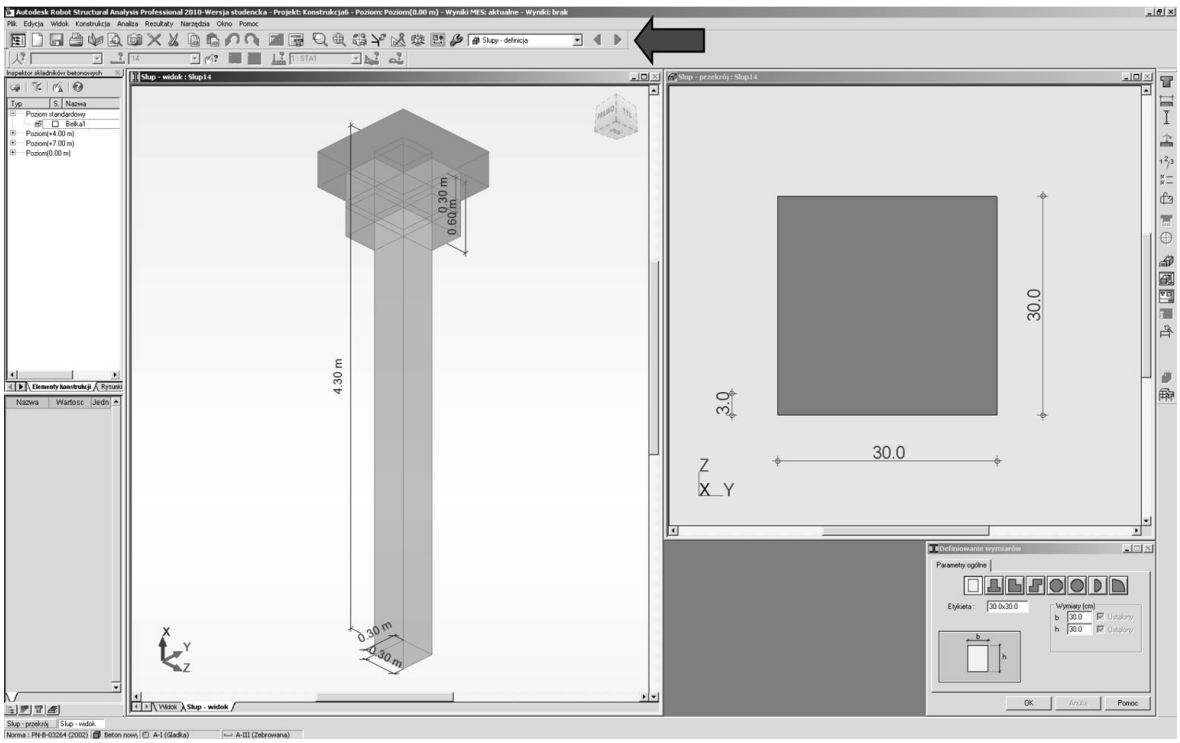


Belka ukośna

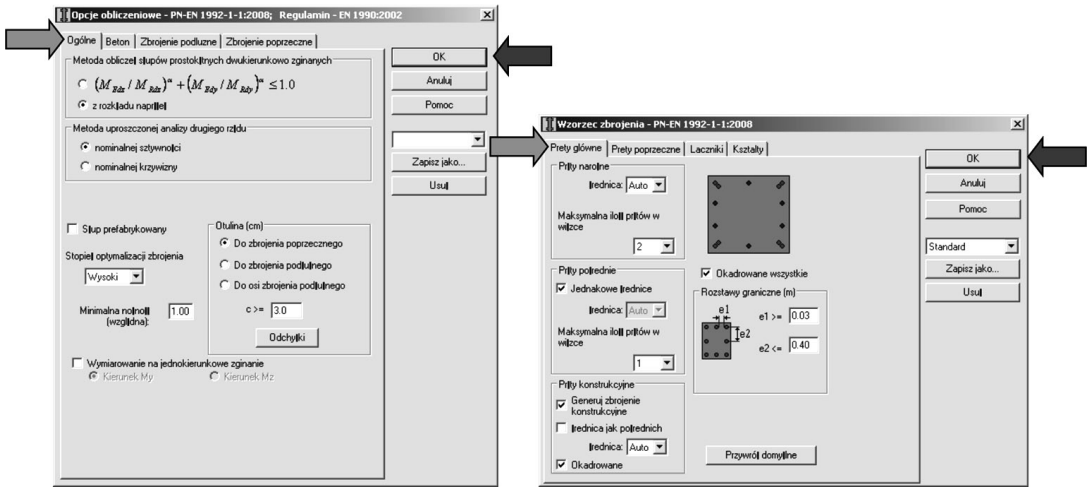
Przed przystąpieniem do wymiarowania wskazujemy na rysunku konstrukcji lewą belkę ukośną górnej kondygnacji ramy centralnej (element skończony 23). Dalsze operacje prowadzimy dokładnie tak samo jak w przypadku belki poziomej, czyli najpierw przechodzimy do modułu wymiarowania (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie belek żelbetowych***). W module tym, na ekranie ***Belki – definicja***, przyjmujemy wszystkie opcje obliczeniowe (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) i parametry zbrojenia (***Analiza → Parametry zbrojenia...***) identyczne jak w przypadku poprzednim. Następnie uruchamiamy obliczenia zbrojenia rzeczywistego (***Analiza → Obliczenia...***). Na kolejnym ekranie ***Belki – wyniki***, tak samo jak poprzednio, możemy obejrzeć obwiednię sił przekrojowych występujących w konstrukcji oraz nośności konstrukcji dla przyjętego rozkładu zbrojenia. Tak samo jak poprzednio, po przejściu na ekran ***Belki – zbrojenie*** możemy zobaczyć rozmieszczenie zbrojenia w belce w widoku z boku i widoku czołowym oraz zestawienie zbrojenia w postaci tabelarycznej, a na ekranie ***Belki – edycja zbrojenia*** dokonać jego edycji. Niestety opcja wykonywania rysunków wykonawczych dla belek ukośnych nie jest na razie zaimplementowana.

Słup

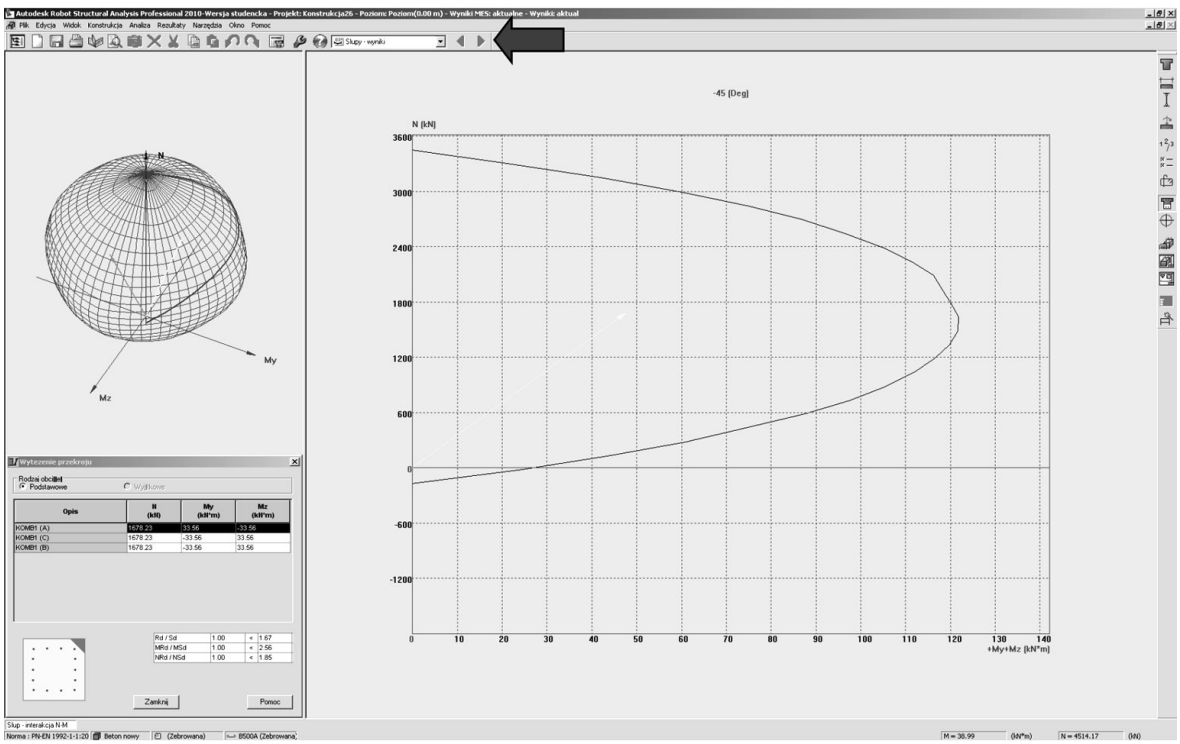
Tak jak w obydwu poprzednich przypadkach wymiarowanie rozpoczynamy od wskazania na rysunku konstrukcji słupa centralnego (element skończony 14). Do wymiarowania przystępujemy w drugiej kolejności (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie słupów betonowych***). Na ekranie ***Słupy – definicja***, który zostanie wówczas otwarty, możemy zweryfikować poprawność przekazania geometrii z modułu obliczeniowego MES do modułu wymiarowania:



Przed rozpoczęciem obliczeń zbrojenia rzeczywistego słupa należy ustalić opcje obliczeniowe (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) i parametry zbrojenia (***Analiza → Parametry zbrojenia...***) dla słupa. Na kolejnych zakładkach okna *Opcje obliczeniowe* ustalamy metodę obliczeń, grubość otuliny prętów (*Ogólne*), na pozostałych zakładkach ustalamy dokładnie takie same parametry jak w przypadku belki żelbetowej. Na kolejnych zakładkach okna *Wzorzec zbrojenia* ustalamy parametry średnic i rozmieszczenia zbrojenia głównego (*Pręty główne*), strzemion (*Pręty poprzeczne*), sposobu łączenia wkładek zbrojeniowych pomiędzy kondygnacjami (*Łączniki*) oraz kształtów prętów (*Kształty*). Po ustaleniu parametrów zbrojenia uruchamiamy obliczenia zbrojenia rzeczywistego (***Analiza → Obliczenia...***). Podobnie jak w przypadku belki, jeżeli w trakcie obliczeń pojawią się problemy, automatycznie zostanie otwarte okno *Błędy obliczeń* zawierające stosowny komunikat bądź komunikaty.

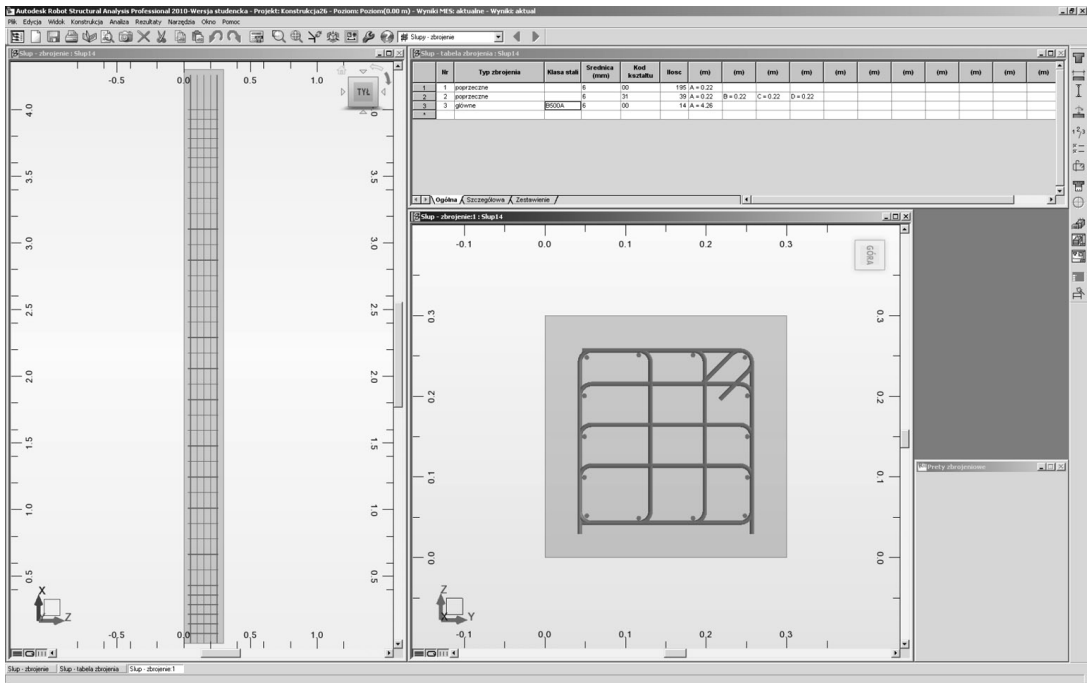


Po wykonaniu obliczeń na ekranie ***Słupy – wyniki*** możemy obejrzeć bryłę interakcji siła podłużna N – moment zginający M dla projektowanego słupa z uwzględnieniem rzeczywistego rozkładu zbrojenia (lewe okno) oraz przekrój tej bryły półpłaszczyzną pionową (prawe okno). Położenie półpłaszczyzny możemy zmienić, poruszając kursorem myszy w prawym oknie. Na rysunku przedstawione są ponadto, w postaci wektorów w przestrzeni N, M_y, M_z, wymiarujące kombinacje tych sił przekrojowych:

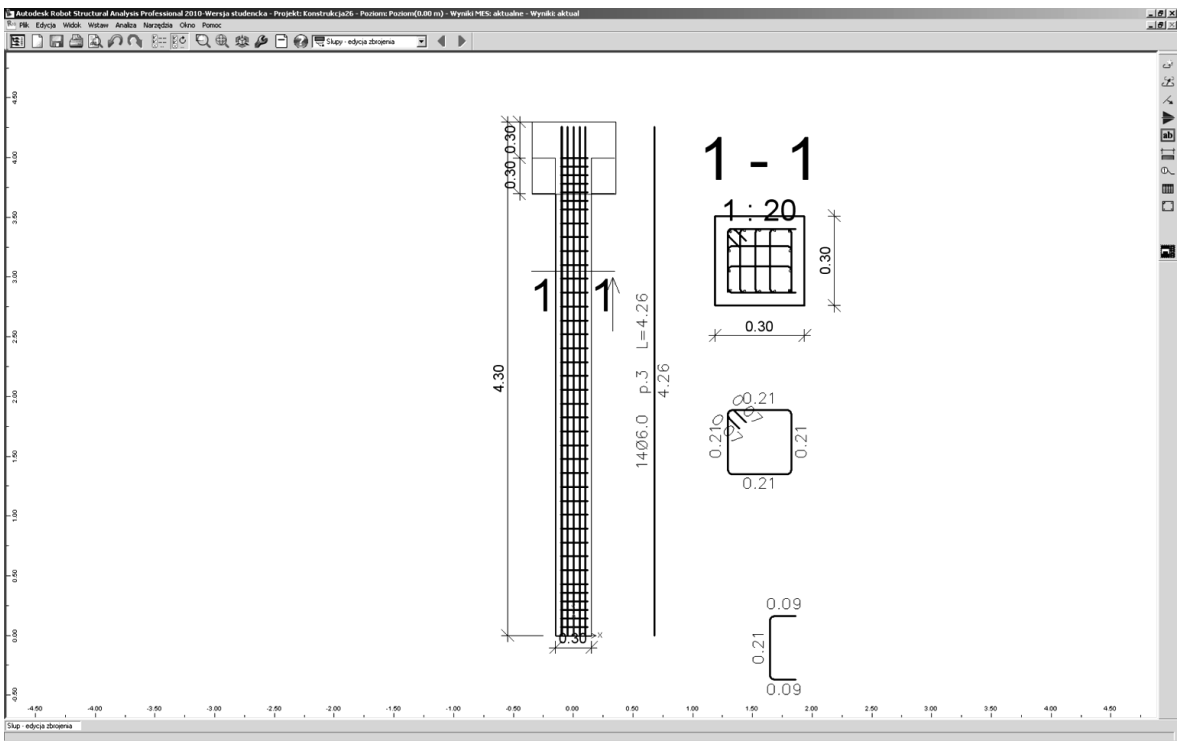


Sposób prezentacji powierzchni interakcji ustalamy, używając opcji dostępnych z głównego paska programu (***Rezultaty → Wytężenie przekroju***, ***Rezultaty → Wykres interakcji N-M***, ***Rezultaty → Wykres interakcji My–Mz***).

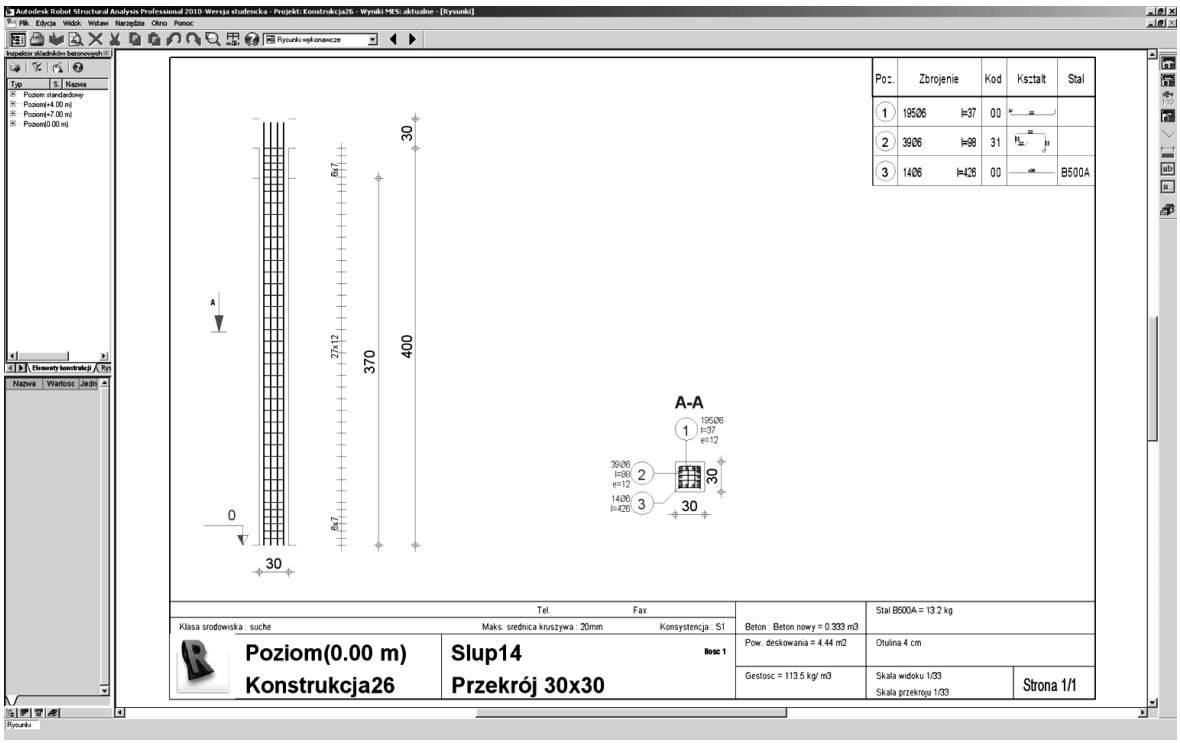
Po przejściu na ekran ***Słupy – zbrojenie*** możemy zobaczyć rozmieszczenie zbrojenia w słupie w widoku z boku i widoku czołowym oraz zestawienie prętów zbrojeniowych w postaci tabelarycznej. Tak jak w przypadku zbrojenia rozmieszczonego w płycie czy belce, po wskazaniu pręta bądź grupy prętów na rysunku (*Shift + lewy*) odpowiadające im wiersze tabeli zostaną podświetlone i na odwrót, jeżeli wskażemy wiersz lub wiersze w tabeli, odpowiadające im pręty zostaną podświetlone na czerwono na rysunku. Podobnie jak w płycie czy belce możliwe jest usunięcie wskazanych prętów zbrojenia głównego i poprzecznego, należy jednak wówczas pamiętać o weryfikacji zmienionego zbrojenia (***Analiza → Weryfikacja***).



Na kolejnym ekranie dotyczącym projektowania słupów (***Słupy – edycja zbrojenia***) mamy możliwość modyfikacji kształtów i liczby automatycznie rozmieszczonych wkładek zbrojenia. Zasady postępowania są tu identyczne jak w przypadku belek. Podobnie jak przy modyfikacji zbrojenia w belce mamy możliwość dodania przekroju bądź przekrojów (***Wstaw → Przekrój***):

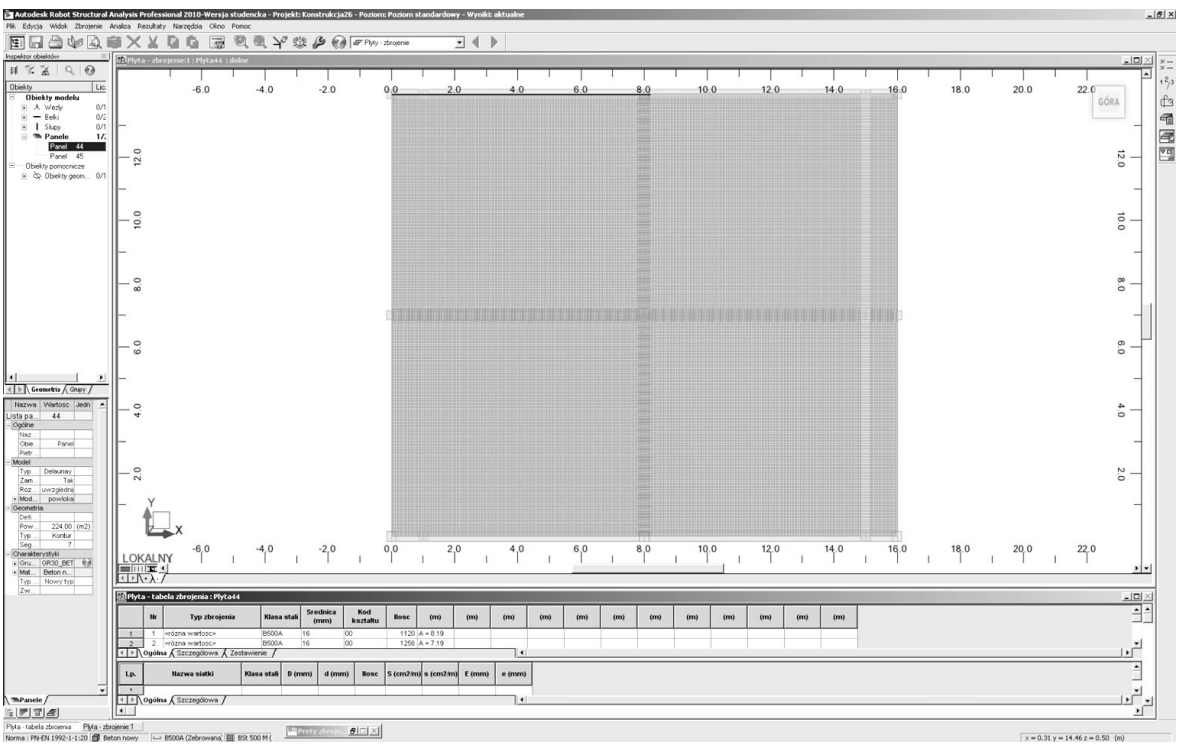


Na zakończenie, po ostatecznym zaakceptowaniu rozmieszczenia zbrojenia w projektowanym słupie, możemy przejść do tworzenia rysunku wykonawczego (***Rezultaty → Rysunki***). Opcja ta dostępna jest jedynie na ekranach: ***Słupy – definicja***, ***Słupy – wyniki***, ***Słupy – zbrojenie***.



Płyta

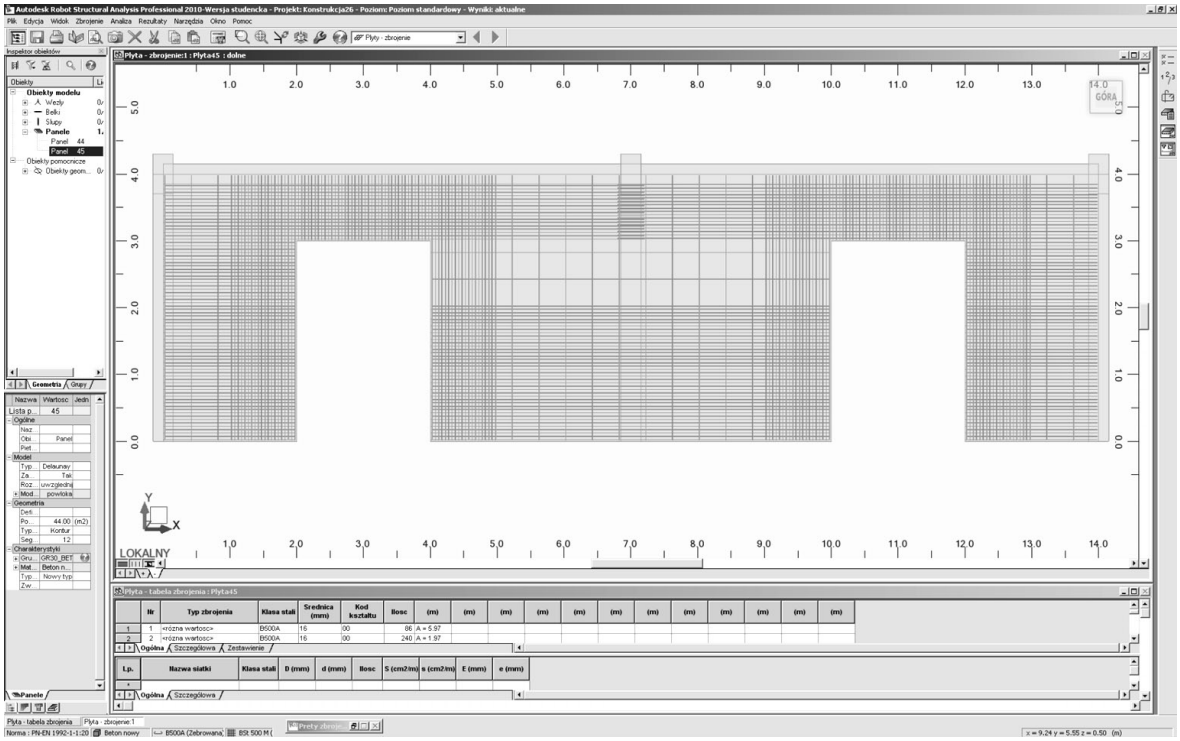
Obliczenia zbrojenia płyty przebiegają identycznie jak w poprzednim ćwiczeniu (*Ćwiczenie 5*) i dlatego nie będziemy ich tu ponownie przedstawiać, a ograniczymy się jedynie do przestawienia uzyskanych wyników w postaci rozkładu zbrojenia górnego. Rozkład ten został uzyskany przy takich samych ustawieniach opcji obliczeniowych (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) i parametrów zbrojenia (***Analiza → Parametry zbrojenia...***) jak w poprzednim ćwiczeniu:



Tak samo też generuje się rysunki wykonawcze (***Rezultaty → Rysunki***), otrzymując w wyniku plan deskowania, rozmieszczenie zbrojenia dolnego i górnego oraz zestawienie wkładek.

Ściana

Obliczenia zbrojenia ściany żelbetowej przebiegają w bieżącej wersji programu dokładnie tak jak obliczenia dla płyty szkicowo przedstawione powyżej, a dokładnie w poprzednim ćwiczeniu. Przedstawiony poniżej rozkład zbrojenia w ścianie żelbetowej został uzyskany przy takich samych ustawieniach opcji obliczeniowych (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) i parametrów zbrojenia (***Analiza → Parametry zbrojenia...***) jak w płycie powyżej:

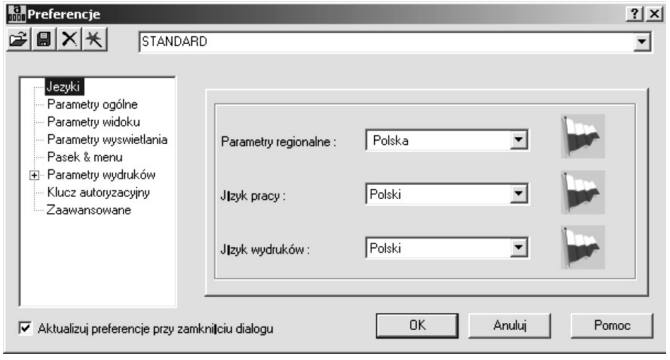


Ćwiczenie 7
Silos stalowy 3D

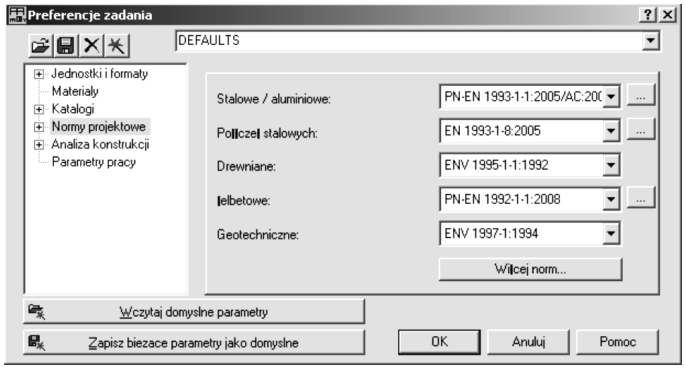
Nowe polecenia: Walec, Stożek, Obciążenia rzutowane, Ograniczenia geometryczne

1. Konfiguracja programu
Wybieramy typ zadania – projektowanie powłoki

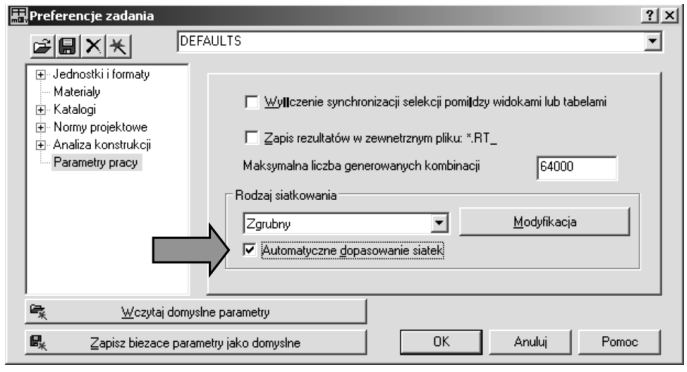
weryfikujemy ustawienia regionalne (***Narzędzia → Preferencje***):



ustalamy parametry projektu (***Narzędzia → Preferencje zadania***), sprawdzając czy w grupie *Normy projektowe* zostały ustawione aktualnie obowiązujące w Polsce normy:



ponadto w grupie *Parametry pracy* włączamy opcję **Automatyczne dopasowanie siatek**:



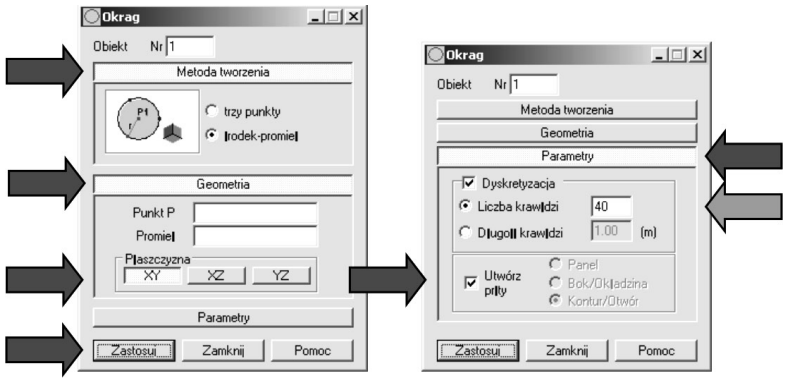
2. Osie konstrukcji

Osie konstrukcji (***Geometria → Osie konstrukcji***) w układzie ***walcowym*** wprowadzamy następująco:

– w kierunku ***R*** : 0,00; 3,00 m; styl numeracji 1, 2, 3, ...
– w kierunku **Φ** : 0,0; 45,0; 90,0; 135,0; 180,0; 225,0; 270,0; 315,0; 360,0 °; styl numeracji A, B, C, ...
– w kierunku ***Z*** : 0,00; 2,00; 4,00; 6,00; 8,00; 10,00; 12,00; 14,00 m; styl numeracji *Definiuj* P1, P2, P3

3. Geometria pierścienia wzmacniającego

Wprowadzamy pierścienie wzmacniające w strefie przypodporowej (***Geometria → Obiekty → Okrąg***). W tym celu utworzymy okrąg o promieniu 3,00 m i środku w początku układu współrzędnych metodą **środek**, **promień**. Okrąg leży w płaszczyźnie ***XY***. Ponieważ zależy nam na precyzyjnym odtworzeniu geometrii obiektu, która ma zasadniczy wpływ na dokładność wyznaczenia sił przekrojowych w konstrukcji cienkościennej, zmienimy domyślne wartości parametrów generacji okręgu, ustalając dyskretyzację z liczbą krawędzi równą **40** i zważając, aby była włączona opcja **Utwórz pręty**:



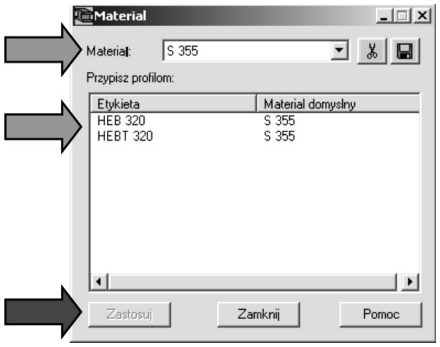
Po wprowadzeniu wszystkich parametrów akceptujemy wybór przyciskiem *Zastosuj*.

Kopiujemy tak utworzony okrąg z płaszczyzny $Z = 0{,}00$ m na płaszczyznę $Z = 2{,}00$ m (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***) z wektorem translacji **0,00**; **0,00**; **2,00** m, pamiętając o wybraniu opcji **Kopiowanie** w grupie *Tryb edycji*.

Wprowadzamy osiem prętów pionowych łączących pierścienie, rozmieszczonych na obwodzie równomiernie co 45°. Każdy z prętów przedłużamy o 2,00 m w dół w celu utworzenia słupów wsporczych (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***). Najwygodniej jest wykonać tę operację, zaznaczając wszystkie pręty pionowe i kopiując jednym poleceniem z wektorem translacji 0,00; 0,00; –2,00 m, czyli w oknie dialogowym *Translacja* wprowadzamy *Wektor translacji (m)* **0,00**; **0,00**; **–2,00**, *Tryb edycji* **Kopiowanie** i *Liczba powtórzeń* **1**. Wprowadzane dane zatwierdzamy przyciskiem *Wykonaj*.

W znany już sposób (*Ćwiczenie 1*) na listę aktywnych profili prętów wprowadzamy profile **HEB 320** i **HEBT 320**, które zostaną użyte w naszej konstrukcji (***Geometria → Charakterystyki → Profile prętów...***). Pierścieniom oraz prętom łączącym je (numery elementów skończonych od 1 do 88) przypisujemy profil **HEBT 320**, natomiast słupom wsporczym (numery elementów skończonych od 89 do 96) profil **HEB 320**. Do szybkiego wyboru odpowiedniej grupy prętów możemy wykorzystać okno Inspektora obiektów (***Okno → Okno inspektora***).

Wszystkim prętom występującym w konstrukcji przypisujemy materiał Stal S355 (***Geometria → Materiały...***). W oknie dialogowym *Materiał*, które się pojawi, kursorem myszy wskazujemy profil lub profile (*Shift + lewy*), następnie z listy *Materiał* wybieramy ***STAL S355*** i akceptujemy wybór przyciskiem *Zastosuj*:

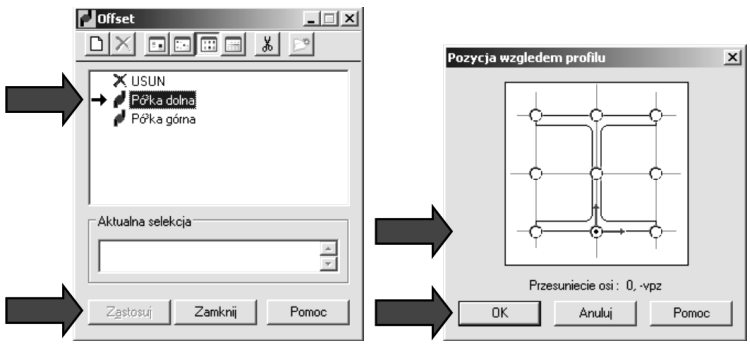


4. Kąt gamma

W sposób przedstawiony w *Ćwiczeniu 2* wszystkim prętom pierścieni nadajemy kąt gamma równy **90°** (***Geometria → Charakterystyki → Kąt gamma...***). Prętom pionowym nadajemy kąt gamma od **45°** do **315°** tak, aby płaszczyzna środnika kształtowników pokrywała się z płaszczyzną pionową przechodzącą przez oś symetrii konstrukcji.

5. Offsety

W sposób przedstawiony w *Ćwiczeniu 4* wprowadzamy offsety dla prętów wykonanych z profilu HEBT w taki sposób, aby na osi pręta obliczeniowego znalazła się *Półka dolna* (***Geometria → Cechy dodatkowe → Offsety...***). Będzie to odpowiadało licowaniu stopki profili HEBT i HEB oraz takiemu ułożeniu profilu HEBT, w którym krawędź środnika znajdzie się na pobocznicy silosu.



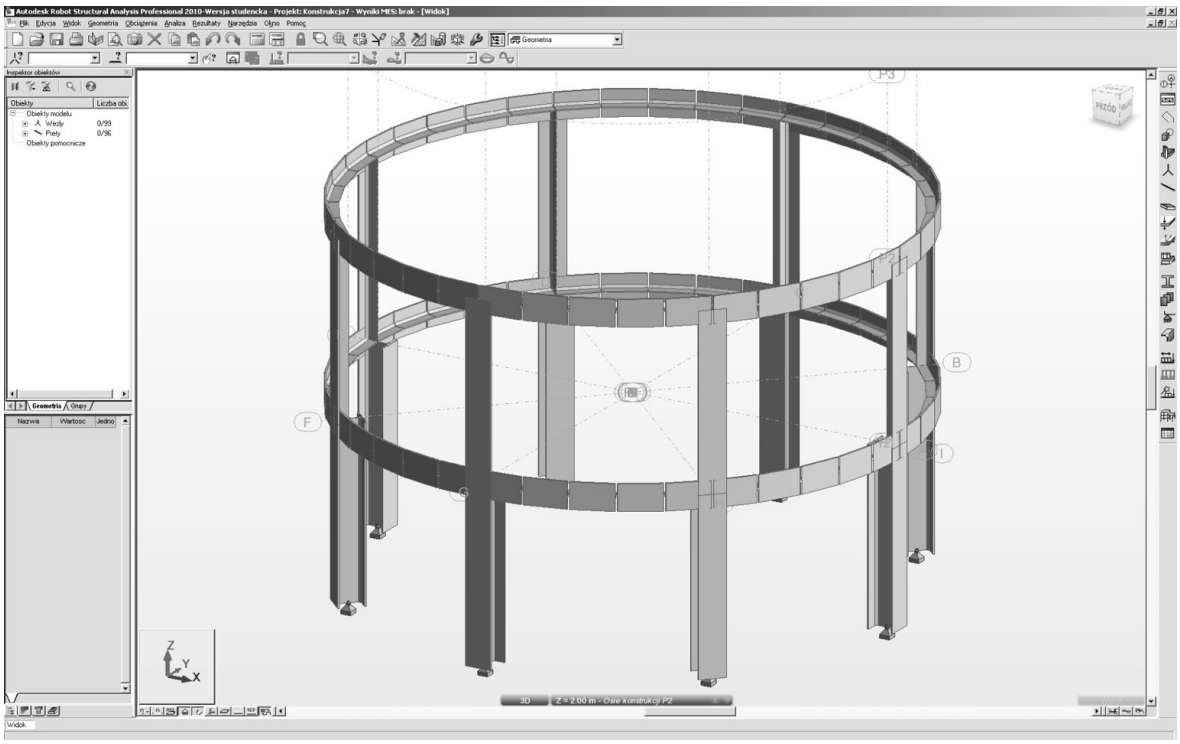
Według oznaczeń używanych w systemie obliczeniowym **Robot** odpowiada to przemieszczeniu względnemu **0**, **–vpz** w układzie lokalnym osi *y*, *z* związanych z przekrojem poprzecznym pręta.

Podobnie jak poprzednio do szybkiego wyboru właściwej grupy prętów możemy wykorzystać okno Inspektora obiektów (***Okno → Okno inspektora***).

6. Podpory

W dolnych węzłach słupów wsporczych wprowadzamy podpory przegubowe (***Geometria → Podpory...***) w sposób przedstawiony w *Ćwiczeniu 1*.

Po wykonaniu wszystkich powyżej wymienionych operacji, włączeniu opcji wizualizacji offsetów i podpór (***Widok → Wyświetl...***) konstrukcja powinna wyglądać jak na poniższym rysunku:

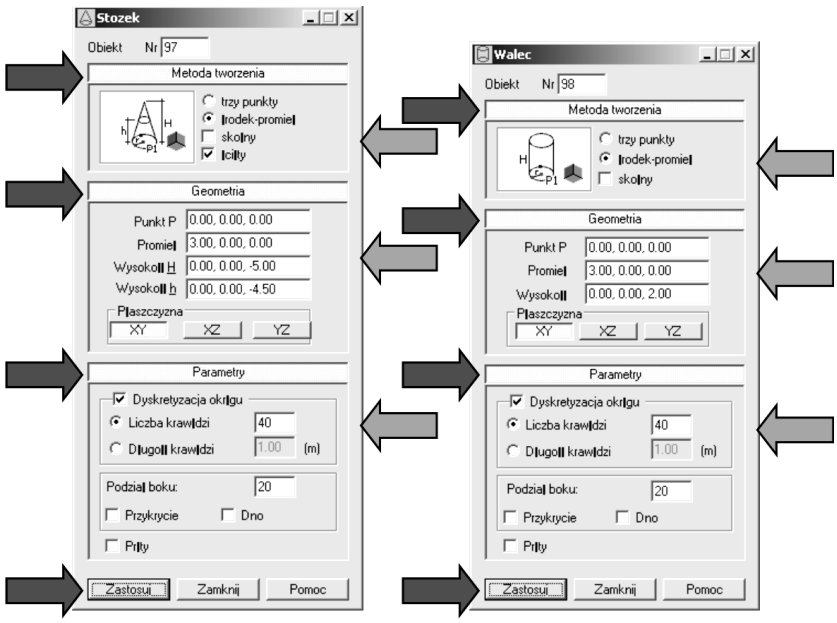


7. Geometria powłoki silosu

Tworzymy lej wysypowy silosu w postaci stożka opartego na okręgu o środku w początku układu współrzędnych i promieniu 3,00 m, pełnej wysokości 5,00 m, w którym usuwamy ostatnie 0,50 m wysokości, uzyskując w ten sposób otwór wysypowy (***Geometria → Obiekty → Stożek...***). Po wciśnięciu przycisku *Metoda tworzenia* wybieramy metodę tworzenia **środek–promień** z opcją **ścięty**. Po wciśnięciu przycisku *Geometria* wprowadzamy współrzędne punktów charakterystycznych definiujących geometrię stożka, pamiętając o tym, aby dla każdego punktu wprowadzić trzy współrzędne określone w globalnym układzie współrzędnych. Tak więc kolejno wprowadzamy *Punkt P* (**0,00**; **0,00**; **0,00**), *Promień* (**3,00**; **0,00**; **0,00**), *Wysokość H* (**0,00**; **0,00**; **–5,00**) oznaczającą pełną wysokość stożka bez uwzględniania ścięcia, *Wysokość h* (**0,00**; **0,00**; **–4,50**) oznaczającą wysokość stożka ściętego oraz wybieramy ***XY*** jako płaszczyznę podstawy. Po wciśnięciu przycisku *Parametry* ustalamy parametry generacji pobocznicy stożka mające istotny wpływ na sposób tworzenia obliczeniowej siatki MES: *Liczbę krawędzi* równą **40**, *Podział boku* na **20** części i wyłączamy opcje **Przykrycie** i **Dno** (lewy rysunek poniżej). Wybór zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj*.

Podobnie tworzymy dwumetrową sekcję części walcowej silosu, w postaci walca o promieniu 3,00 m, wysokości 2,00 m i środku dolnej podstawy leżącym w początku układu współrzędnych (***Geometria → Obiekty → Walec...***). Tak jak w przypadku stożka wybieramy metodę tworzenia **środek–promień**, wprowadzamy *Punkt P* (**0,00**; **0,00**; **0,00**), *Promień* (**3,00**; **0,00**; **0,00**), *Wysokość* (**0,00**; **0,00**; **2,00**) i wybieramy ***XY*** jako płaszczyznę podstawy. Parametry generacji pobocznicy walca ustalamy następująco: *Liczba krawędzi* równa **40**, *Podział boku* na **20** części. Podobnie jak w stożku wyłączamy opcje *Przykrycie* i *Dno* (prawy rysunek poniżej), a wybór zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj*.

Utworzoną sekcję kopiujemy sześciokrotnie (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***). W oknie dialogowym *Translacja* wprowadzamy *Wektor translacji (m)* **0,00**; **0,00**; **2,00**, *Tryb edycji* Kopiowanie i *Liczba powtórzeń* **6**. Wprowadzane dane zatwierdzamy przyciskiem *Wykonaj*.



8. Grubości powłok silosu

Wstępnie do obliczeń przyjęto, że silos zostanie wykonany ze stali S355. Lej będzie wykonany z blachy o grubości 1,6 cm, natomiast część walcowa z blachy o grubości 1,0 cm. W celu wprowadzenia tych informacji do naszej konstrukcji zdefiniujemy dwie nowe grubości elementów skończonych (***Geometria → Charakterystyki → Grubość...***) w sposób przedstawiony w *Ćwiczeniu 5*. Pamiętamy oczywiście o tym, że w oknie *Nowa grubość* grubości elementów skończonych podajemy w centymetrach oraz że w tym samym oknie wybieramy odpowiedni typ materiału.

Pamiętamy również o usunięciu typu zbrojenia, który mógł być automatycznie przypisany do utworzonych przez nas paneli (***Geometria → Parametry normowe → Typ zbrojenia płyt i powłok...***):

Najwygodniej jest to wykonać, wpisując w oknie *Panele* dialogu *Typ zbrojenia płyt i powłok* numery utworzonych paneli, następnie z listy powyżej wybierając *USUŃ typ zbrojenia* i akceptując przyciskiem *Zastosuj*.

9. Obciążenia

Będziemy obliczeniowo analizować przypadek obciążenia ścian silosu materiałem sypkim według teorii Jansena, przy uwzględnieniu przepływu masowego w komorze. W związku z tym zdefiniujemy cztery przypadki obciążenia: ciężarem własnym (***STA1***) i obciążeniem eksploatacyjnym (***EKSP1***, ***EKSP2*** i ***EKSP3***) (***Obciążenia → Przypadki...***). Obciążenie eksploatacyjne pierwsze jest związane z naporem na ściany silosu w części walcowej wyznaczonym według teorii Jansena, drugie wynika z oddziaływania masowego przepływu materiału na ścianki konstrukcji w miejscu połączenia części walcowej z lejem, a trzecie odpowiada za napór materiału na lej wysypowy. Obciążenie eksploatacyjne zostało podzielone na trzy przypadki wyłącznie w celu ułatwienia weryfikacji poprawności zdefiniowania obciążeń, gdyż oczywiście w rzeczywistości wszystkie one występują jednocześnie w trakcie eksploatacji silosu. Ze względu na ograniczone możliwości definiowania obciążeń nieliniowo zmiennych na powierzchni, obciążenie na pobocznicę w części walcowej silosu zostanie przybliżone łamaną. Wierzchołki łamanej będą rozmieszczone równomiernie na wysokości silosu w odległości 2,00 m od siebie.

Po zdefiniowaniu wszystkich przypadków obciążenia okno dialogowe *Przypadki obciążeń* winno wyglądać jak poniżej:

Do wyznaczania naporów przyjęto następujące wartości parametrów materiału zasypowego (wartości charakterystyczne): ciężar objętościowy 17,00 kN/m^3, kąt stoku naturalnego 30°, współczynnik tarcia o ściany 0,40, iloraz naporu poziomego i pionowego 0,65.

Wielkościom tym odpowiadają wartości dynamicznego naporu stycznego i normalnego na wysokości części walcowej (rzędna X mierzona jest od dolnej krawędzi części walcowej) podane w Tablicy 1.

Tablica 1. Wartości naporu normalnego i stycznego według Jansena

Lp.	X [m]	Parcie [kPa]	
		styczne	normalne
1	0,00	25,572	69,743
2	2,00	24,546	66,943
3	4,00	23,094	62,983
4	6,00	21,040	57,382
5	8,00	18,136	49,461
6	10,00	14,028	38,257
7	12,00	8,218	22,411
8	14,00	0,000	0,000

Oddziaływanie od przepływu masowego obejmuje strefy o wysokości 1,80 m od linii przejścia stożka w walec mierzone po wysokości. Maksymalna wartość tego oddziaływania normalnego do tworzącej na linii przejścia jest równa 102,000 kPa i spada liniowo do zera na granicy strefy oddziaływania.

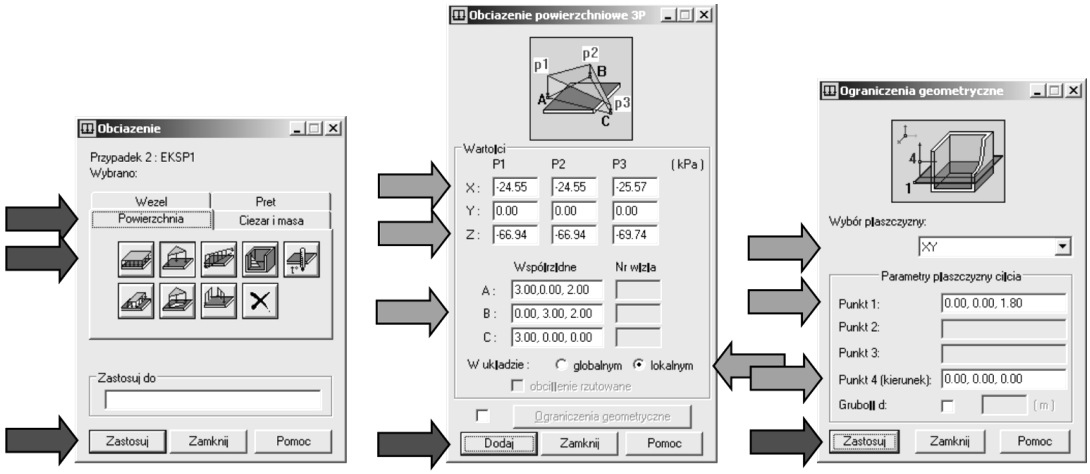
Napór dynamiczny na ścianki leja od materiału zawartego w leju jest równy 46,248 kPa (normalny) i 23,124 kPa (styczny), natomiast od materiału powyżej leja u wlotu (rzędna 0,00 m) jest równy 121,382 kPa (normalny) i 60,691 kPa (styczny), a u wylotu (rzędna 4,50 m) jest równy odpowiednio 35,503 kPa (normalny) i 17,751 kPa (styczny).

Wszystkie obciążenia eksploatacyjne (***Obciążenia → Definicja obciążeń...***) definiujemy jako **Obciążenia powierzchniowe 3P** w układzie lokalnym. Zanim jednak przystąpimy do zadawania tych obciążeń, musimy zweryfikować orientację osi lokalnego układu współrzędnych w panelach, ponieważ dalsze przedstawione tu postępowanie odnosi się do przypadku, gdy oś x lokalnego układu współrzędnych paneli walcowych skierowana jest do góry (czyli przeciwnie do osi Z globalnego układu współrzędnych), a panelu stożkowego w dół wzdłuż tworzącej. W przypadku gdy osie lokalnego układu współrzędnych byłyby zorientowane inaczej, należy tę orientację zmienić (***Geometria → Charakterystyki → Kierunek lokalny paneli...***). W oknie dialogowym *Orientacja układu lokalnego*, które się wówczas pojawi, mamy możliwość ustalenia kierunku i zwrotu nowych osi x i z lokalnego układu współrzędnych. Drugą możliwością postępowania jest dostosowanie wartości i znaków obciążeń przypisywanych w poszczególnych punktach konstrukcji do aktualnych zwrotów osi lokalnego układu współrzędnych.

Obciążenie eksploatacyjne pierwsze (napór dla walca)

Jako punkty *A* i *B* wybieramy punkty leżące na górnej krawędzi walca w odległości kątowej 180° (np. **–3,00**; **0,00**; **2,00** i **3,00**; **0,00**; **2,00**), a jako punkt *C* punkt leżący na osi symetrii walca w poziomie dolnej krawędzi (wówczas **0,00**; **0,00**; **0,00**). W punktach tych podajemy wartości naporu normalnego i stycznego z wierszy 2 (punkty *A* i *B*) i 1 (punkt *C*), biorąc pod uwagę, że w układzie lokalnym napór normalny odpowiada działaniu w kierunku osi *z*, natomiast napór styczny działa w kierunku osi *x*. Szczególną uwagę należy zwrócić na zwroty działających naporów.

Tak więc w punktach *A* i *B* wartości naporów będą równe (**–24,546**; **0,00**; **–66,943**), natomiast w punkcie *C* (**–25,572**; **0,00**; **–69,743**). Wartości te wprowadzamy do bazy obciążeń przyciskiem *Dodaj*. Zdefiniowane obciążenie przykładamy do pobocznicy walca przyciskiem *Zastosuj* w oknie dialogowym *Obciążenia*:



Tak zdefiniowane obciążenie zostało przyłożone do najniższej sekcji części walcowej silosu. Operację tę powtarzamy dla pozostałych sekcji tej części, pamiętając za każdym razem o zmianie składowych wektora naporu (odpowiednie wiersze Tablicy 1) i trzeciej współrzędnej punktów *A*, *B* i *C*, tak aby odpowiadała ona położeniu stosownej sekcji w przestrzeni.

Obciążenie eksploatacyjne drugie (przepływ masowy)

W części walcowej jako punkty *A* i *B* wybieramy punkty leżące na dolnej krawędzi walca w odległości kątowej 180° (np. **–3,00**; **0,00**; **0,00** i **3,00**; **0,00**; **0,00**), a jako punkt *C* punkt leżący na osi symetrii walca w poziomie górnej krawędzi (wówczas **0,00**; **0,00**; **2,00**). W punktach tych podajemy wartości naporu normalnego **–102,000** kPa dla punktów *A* i *B* oraz **11,333** kPa dla punktu *C* (wartość ta została obliczona z proporcji, tak aby uzyskać zerowanie się naporu normalnego na wysokości 1,80 m nad dolnym pierścieniem części cylindrycznej). Aby ograniczyć zakres oddziaływania zdefiniowanego obciążenia jedynie do wysokości 1,80 m ponad dolnym pierścieniem, posłużymy się ograniczeniem geometrycznym obszaru oddziaływania. W tym celu w oknie dialogowym *Obciążenie powierzchniowe 3p* przy wprowadzaniu danych wybieramy opcję **Ograniczenia geometryczne**. W oknie dialogowym *Ograniczenia geometryczne*, które się wówczas pojawi, wybieramy płaszczyznę ***XY***, jako *Punkt 1* podajemy dowolny punkt leżący na płaszczyźnie poziomej o rzędnej *Z* równej 1,80 m (np. **0,00**; **0,00**; **1,80**), a jako *Punkt 4*, wyznaczający wybraną stronę płaszczyzny tnącej, dowolny punkt poniżej niej (np. **0,00**; **0,00**; **0,00**). Ustawienia jak zwykle akceptujemy przyciskiem *Zastosuj*.

W części stożkowej jako punkty *A* i *B* wybieramy punkty leżące na górnej krawędzi stożka w odległości kątowej 180° (np. **3,00**; **0,00**; **0,00** i **–3,00**; **0,00**; **0,00**), a jako punkt *C* punkt leżący na osi symetrii stożka w poziomie dolnej krawędzi (wówczas **0,00**; **0,00**; **–4,50**). W punktach tych podajemy wartości naporu normalnego **–102,000** kPa dla punktów *A* i *B* oraz **153,000** kPa dla punktu *C* (wartość ta podobnie jak dla walca została obliczona z proporcji tak, aby uzyskać zerowanie się naporu normalnego na wysokości 1,80 m poniżej górnej podstawy stożka). Aby ograniczyć zakres oddziaływania zdefiniowanego obciążenia jedynie do wysokości 1,80 m poniżej górnej podstawy, posłużymy się, tak jak powyżej, ograniczeniem geometrycznym obszaru oddziaływania. W tym celu w oknie dialogowym *Ograniczenia geometryczne* wybierzemy płaszczyznę ***XY***, jako *Punkt 1* podamy dowolny punkt leżący na płaszczyźnie poziomej o rzędnej *z* równej –1,80 m (np. **0,00**; **0,00**; **–1,80**), a jako *Punkt 4*, wyznaczający wybraną stronę płaszczyzny tnącej, dowolny punkt powyżej niej (np. **0,00**; **0,00**; **0,00**).

Obciążenie eksploatacyjne trzecie (napór dla stożka)

Jako punkty *A* i *B* wybieramy punkty leżące na górnej krawędzi stożka w odległości kątowej 180° (np. **–3,00**; **0,00**; **0,00** i **3,00**; **0,00**; **0,00**), a jako punkt *C* punkt leżący na osi symetrii stożka w poziomie dolnej krawędzi (wówczas **0,00**; **0,00**; **–4,50**). W punktach tych podajemy wartości naporu normalnego i stycznego na ścianki leja po zsumowaniu oddziaływania od materiału w leju i powyżej leja. W leju tak jak w części walcowej w układzie lokalnym napór normalny odpowiada działaniu w kierunku osi *z*, natomiast napór styczny działa w kierunku osi ***x***.

Ostatecznie w punktach *A* i *B* wartości naporów będą równe (**83,815**; **0,00**; **–167,630**), a w punkcie *C* (**40,875**; **0,00**; **–81,751**). Wartości te wprowadzamy do bazy obciążeń i przykładamy do pobocznicy stożka przyciskiem *Zastosuj* w oknie dialogowym *Obciążenia*.

10. Obciążenia

Po określeniu wszystkich obciążeń weryfikujemy poprawność ich definicji w tabeli obciążeń (***Widok → Tabele...***). Stosowna tabela winna wyglądać następująco:

	Przypadek	Typ obciazenia	Lista																			
	1:STA1	ciezar wlasny	1do104	Cala konstruk	-Z	Wsp=1.00	MEMO :															
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	98_BOK(1)	PX1=-24.55	PY1=0.	PZ1=-66.94	PX2=-24.5	PY2=0.0	PZ2=-66.94	PX3=-25.57	PY3=0.0	PZ3=-69.74	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=2.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=2.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=0.0	
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	99_BOK(1)	PX1=-23.09	PY1=0.	PZ1=-62.98	PX2=-23.0	PY2=0.0	PZ2=-62.98	PX3=-24.55	PY3=0.0	PZ3=-66.94	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=4.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=4.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=2.00	
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	100_BOK(1)	PX1=-21.04	PY1=0.	PZ1=-57.38	PX2=-21.0	PY2=0.0	PZ2=-57.38	PX3=-23.09	PY3=0.0	PZ3=-62.98	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=6.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=6.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=4.00	
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	101_BOK(1)	PX1=-18.14	PY1=0.	PZ1=-49.46	PX2=-18.1	PY2=0.0	PZ2=-49.46	PX3=-21.04	PY3=0.0	PZ3=-57.38	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=8.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=8.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=6.00	
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	102_BOK(1)	PX1=-14.03	PY1=0.	PZ1=-38.26	PX2=-14.0	PY2=0.0	PZ2=-38.26	PX3=-18.14	PY3=0.0	PZ3=-49.46	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=10.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=10.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=8.00	
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	103_BOK(1)	PX1=-8.22	PY1=0.	PZ1=-22.41	PX2=-8.22	PY2=0.0	PZ2=-22.41	PX3=-14.03	PY3=0.0	PZ3=-38.26	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=12.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=12.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=10.00	
	2:EKSP1	(ES) powierzchniowe	104_BOK(1)	PX1=0.0	PY1=0.	PZ1=0.0	PX2=0.0	PY2=0.0	PZ2=0.0	PX3=-8.22	PY3=0.0	PZ3=-22.41	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=14.00	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=14.00	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=12.00	
	3:EKSP2	(ES) powierzchniowe	98_BOK(1)	PX1=0.0	PY1=0.	PZ1=-102.00	PX2=0.0	PY2=0.0	PZ2=-102.00	PX3=0.0	PY3=0.0	PZ3=11.33	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=0.0	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=0.0	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=2.00	
	3:EKSP2	(ES) powierzchniowe	97_BOK(1)	PX1=0.0	PY1=0.	PZ1=-102.00	PX2=0.0	PY2=0.0	PZ2=-102.00	PX3=0.0	PY3=0.0	PZ3=153.00	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=0.0	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=0.0	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=-4.50	
	4:EKSP3	(ES) powierzchniowe	97_BOK(1)	PX1=83.81	PY1=0.	PZ1=-167.63	PX2=83.81	PY2=0.0	PZ2=-167.63	PX3=40.88	PY3=0.0	PZ3=-81.75	N1X=-3.00	N1Y=0.0	N1Z=0.0	N2X=3.00	N2Y=0.0	N2Z=0.0	N3X=0.0	N3Y=0.0	N3Z=-4.50	
*																						

nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :
nierzutowane	lokalny	Ograniczenia	MEMO :

11. Siatka obliczeniowa MES

Przed przystąpieniem do operacji siatkowania sprawdzamy czy przypadkiem nie został wybrany któryś z paneli. Jeżeli tak, to należy usunąć selekcję. Parametry generacji siatki MES w panelach są takie jak parametry generacji obiektów powierzchniowych ustalone przy tworzeniu powłoki silosu (punkt 7). Generację siatki uruchamiamy tak jak w poprzednich przykładach (***Analiza → Model obliczeniowy → Generacja***). Utworzoną siatkę możemy zamrozić (***Analiza → Model obliczeniowy → Zamrożenie siatki***), aby uniknąć przypadkowej jej modyfikacji.

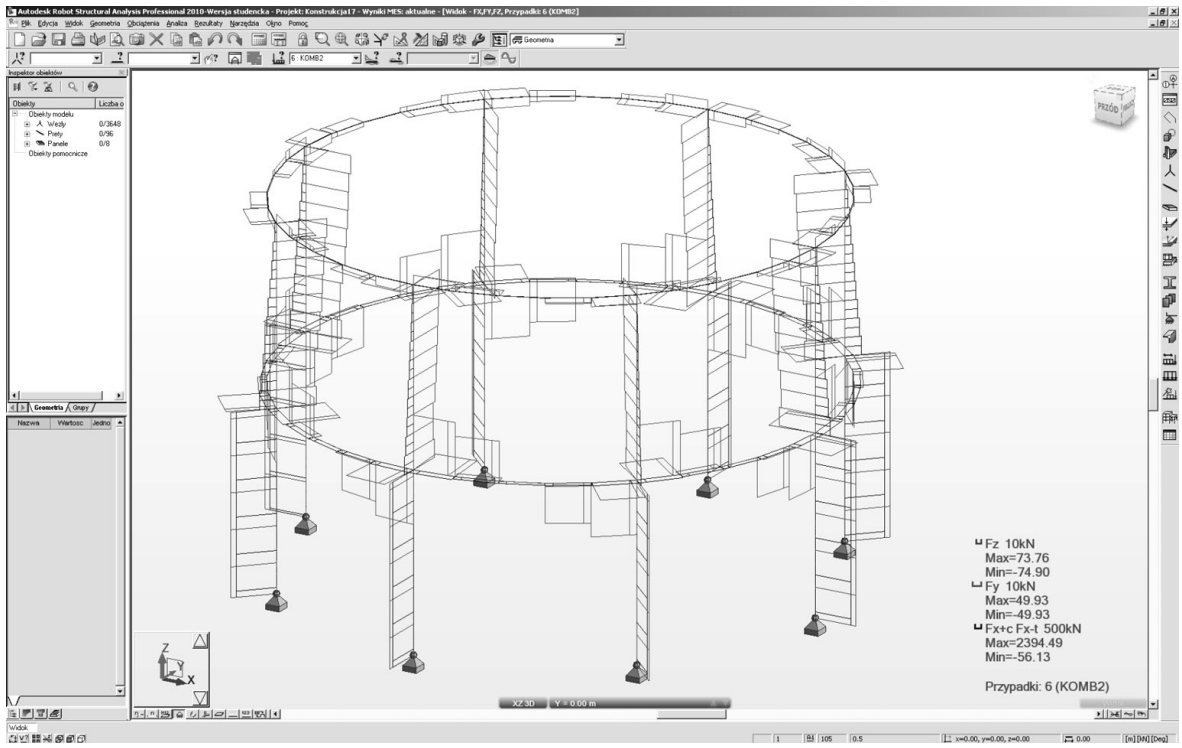
12. Obliczenia

Definiujemy cztery kombinacje (***Obciążenia → Kombinacje ręczne...***), w skład których wchodzą po pierwsze wyłącznie obciążenia ciężarem własnym (silos pusty), po drugie wszystkie obciążenia przyłożone do naszej konstrukcji (chwila rozpoczęcia opróżniania silosu całkowicie napełnionego) z normowymi mnożnikami wynikającymi z ich natury. Utworzymy dwie kombinacje Stanu Granicznego Nośności (***KOMB1*** i ***KOMB2***) i dwie kombinacje Stanu Granicznego Użytkowania (***KOMB3*** i ***KOMB4***) odpowiadające tym stanom. Dla tak zdefiniowanych kombinacji dokonujemy analizy konstrukcji.

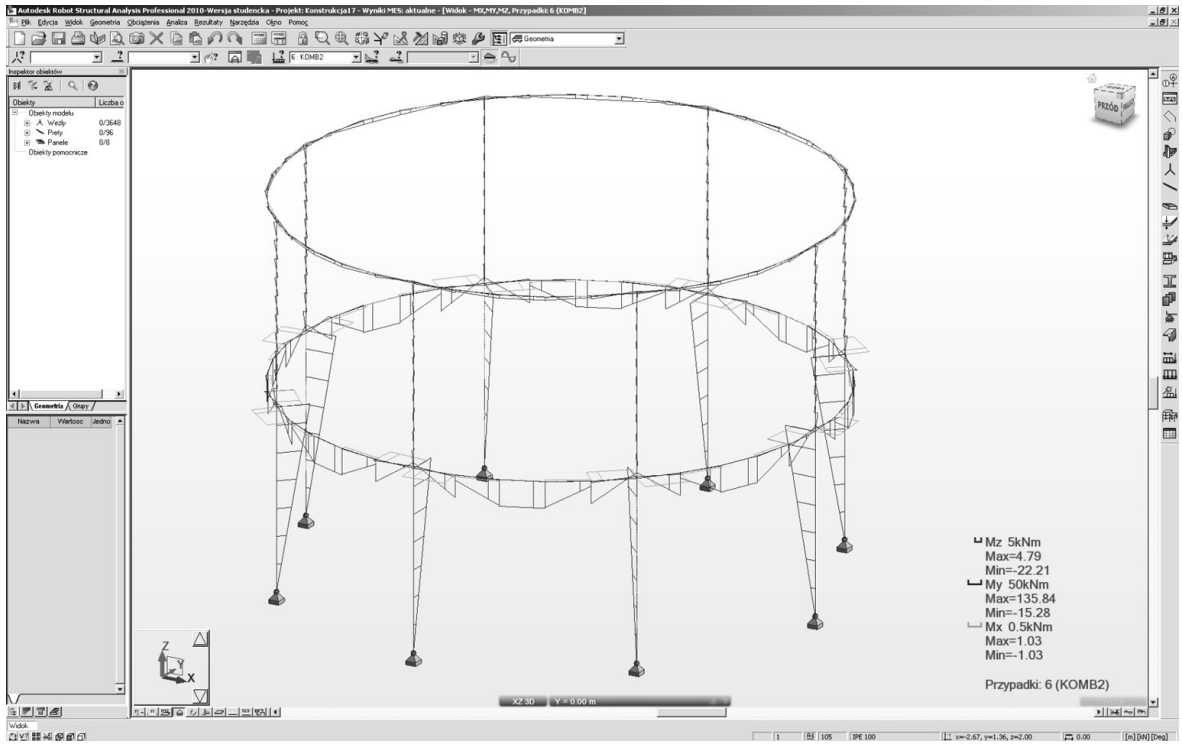
Kombinacja	Nazwa	Typ analizy	Natura kombi	Natura przypadku	Definicja
11 (K)	KOMB1	Kombinacja liniowa	SGN	ciężar własny	1*1.00
12 (K)	KOMB2	Kombinacja liniowa	SGN	ciężar własny	1*1.10+(2+3+4)*1.30
13 (K)	KOMB3	Kombinacja liniowa	SGU	ciężar własny	1*1.00
14 (K)	KOMB4	Kombinacja liniowa	SGU	ciężar własny	(1+2+3+4)*1.00

13. Prezentacja wyników

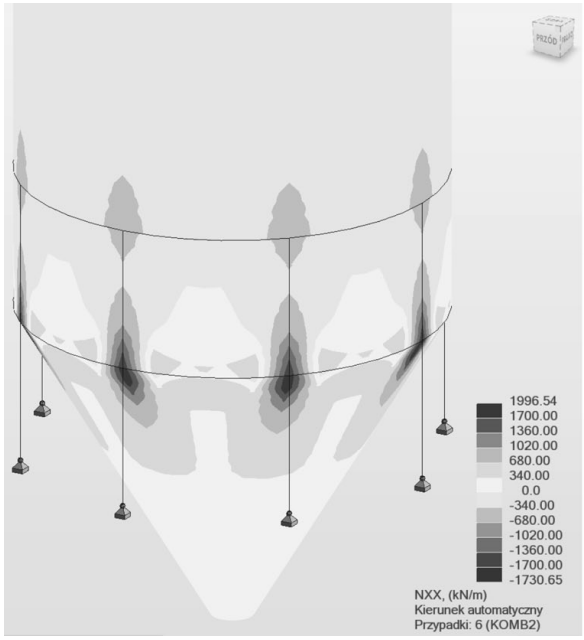
Wykorzystując polecenia poznane w trakcie wcześniejszych zajęć, możemy dokonać wizualizacji stanu naprężenia i przemieszczenia w konstrukcji będącego skutkiem przyłożonych obciążeń. I tak na przykład wartości sił przekrojowych w prętach konstrukcji dla kombinacji pierwszej w rozbiciu na siły (N_x, N_y, N_z) i momenty (M_x, M_y, M_z) wyglądają następująco:



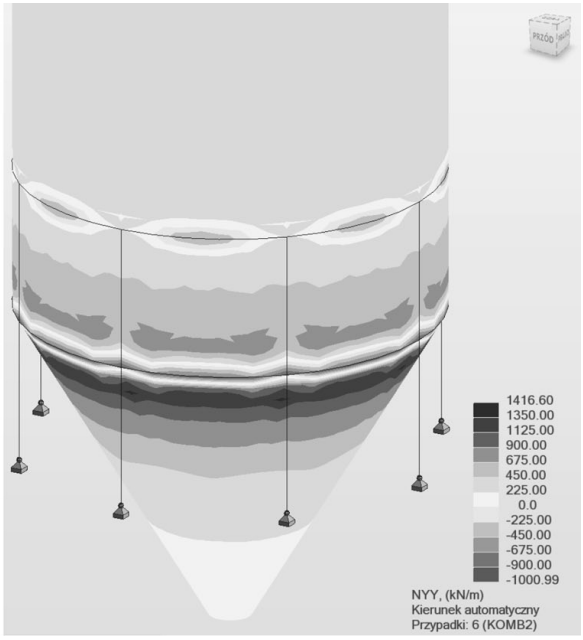
oraz



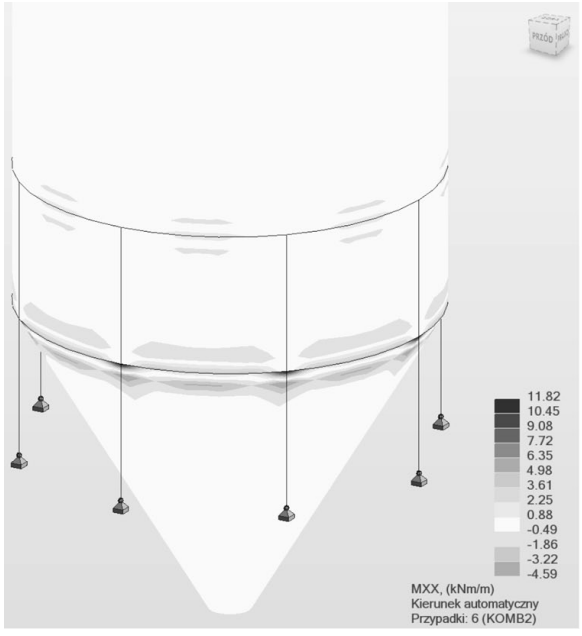
Plany warstwicowe wybranych uogólnionych sił przekrojowych w strefie przypodporowej i otoczeniu leja wysypowego silosu dla tej samej kombinacji obciążeń przedstawiają się jak poniżej, odpowiednio dla N_{xx}, N_{yy}, M_{xx}, M_{yy}:



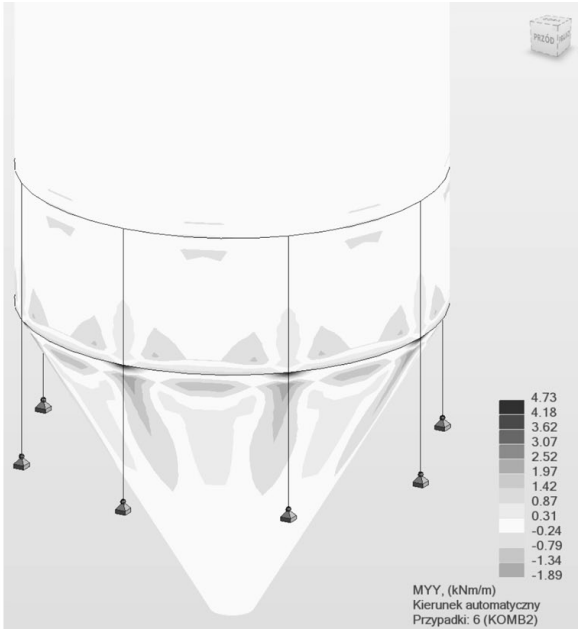
N_{xx}



N_{yy}



M_{xx}

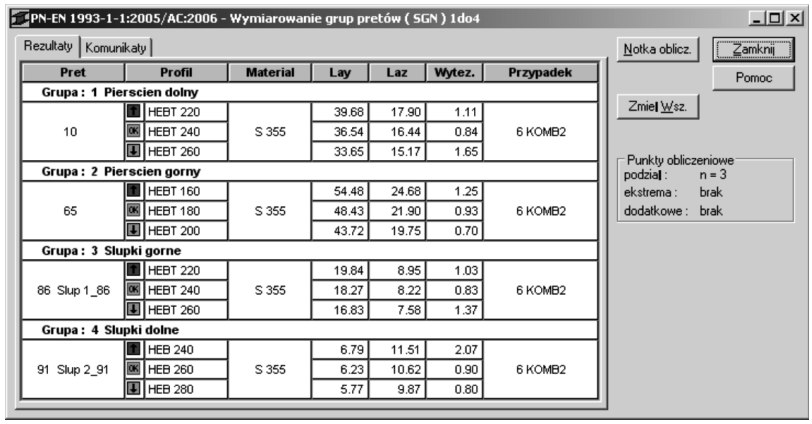


M_{yy}

14. Wymiarowanie

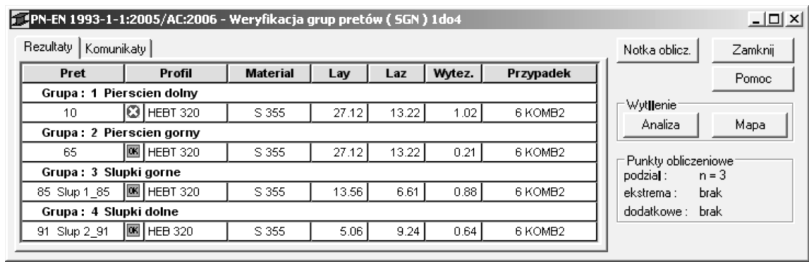
Po wyznaczeniu sił przekrojowych możemy przystąpić do weryfikacji nośności profili stalowych przyjętych w naszej konstrukcji. Rozpoczniemy od przypisania poszczególnym prętom odpowiedniego typu elementu stalowego (***Geometria → Parametry normowe → Typ pręta stalowego/aluminiowego...***). Prętom pierścieni wzmacniających (wszystkie pręty poziome) przypiszemy typ *Belka 1*, a pozostałym prętom typ *Słup 1* (pręty łączące pierścienie) i *Słup 2* (pozostałe pręty pionowe). W definicji elementów typu Belka 1 i Słup 1 wprowadzimy utwierdzenie na obydwu końcach, natomiast w elementach typu Słup 2 wprowadzimy utwierdzenie u góry i przegub u dołu. Pręty konstrukcji podzielimy na cztery grupy: pierścień górny, pierścień dolny, słupki górne i słupki dolne. W pierwszych trzech grupach dopuścimy optymalizację profili w grupie HEBT, a w ostatniej w grupie HEB (*Ćwiczenie 2*). Po wykonaniu wymiarowania grup prętów (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Obliczenia...***) dla następującego zestawu opcji obliczeniowych:

wyniki powinny przedstawiać się następująco:



Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przypadek
Grupa : 1 Pierscien dolny						
10	HEBT 220	S 355	39.68	17.90	1.11	6 KOMB2
	HEBT 240		36.54	16.44	0.84	
	HEBT 260		33.65	15.17	1.65	
Grupa : 2 Pierscien gorny						
65	HEBT 160	S 355	54.48	24.68	1.25	6 KOMB2
	HEBT 180		48.43	21.90	0.93	
	HEBT 200		43.72	19.75	0.70	
Grupa : 3 Slupki gorne						
86 Slup 1_86	HEBT 220	S 355	19.84	8.95	1.03	6 KOMB2
	HEBT 240		18.27	8.22	0.83	
	HEBT 260		16.83	7.58	1.37	
Grupa : 4 Slupki dolne						
91 Slup 2_91	HEB 240	S 355	6.79	11.51	2.07	6 KOMB2
	HEB 260		6.23	10.62	0.90	
	HEB 280		5.77	9.87	0.80	

Jednak, ponieważ ze względów konstrukcyjnych utrzymano profile prętów takie jak podano w temacie, weryfikacja nośności przebiega jak niżej:



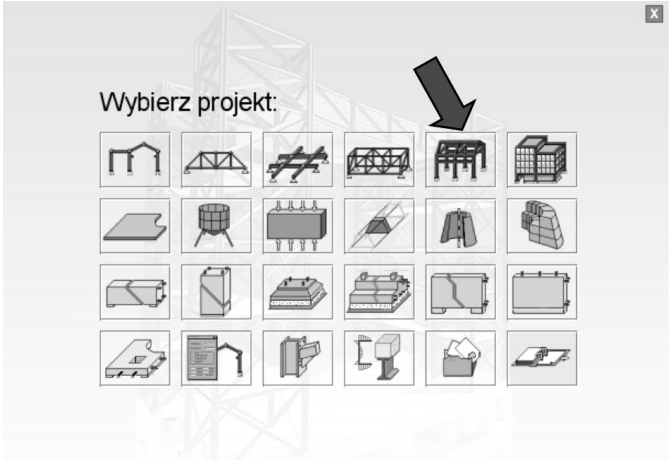
Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przypadek
Grupa : 1 Pierscien dolny						
10	HEBT 320	S 355	27.12	13.22	1.02	6 KOMB2
Grupa : 2 Pierscien gorny						
65	HEBT 320	S 355	27.12	13.22	0.21	6 KOMB2
Grupa : 3 Slupki gorne						
85 Slup 1_85	HEBT 320	S 355	13.56	6.61	0.88	6 KOMB2
Grupa : 4 Slupki dolne						
91 Slup 2_91	HEB 320	S 355	5.06	9.24	0.64	6 KOMB2

Zapisujemy efekty dotychczasowej pracy w pliku *Konstrukcja7.rtd* (***Plik → Zapisz projekt jako...***).

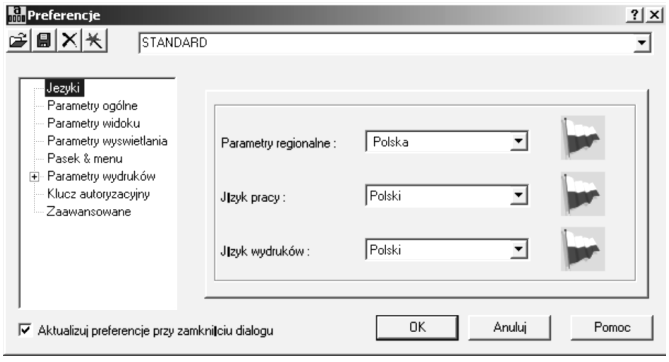
Ćwiczenie 8
Obciążenie ruchome 3D

Nowe polecenia: Łuk, Obciążenia ruchome, Linie wpływu, Sprężenie

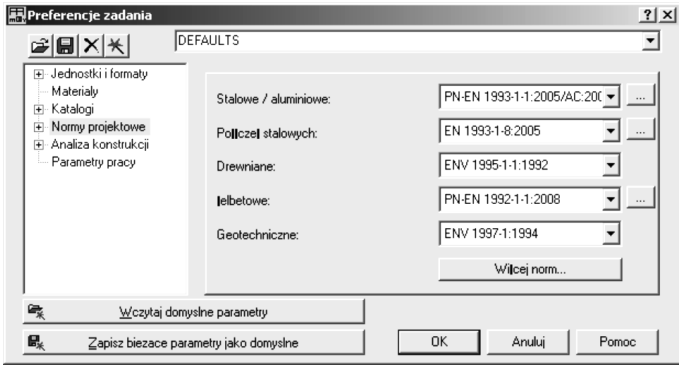
1. Konfiguracja programu
Wybieramy typ zadania – projektowanie ramy przestrzennej



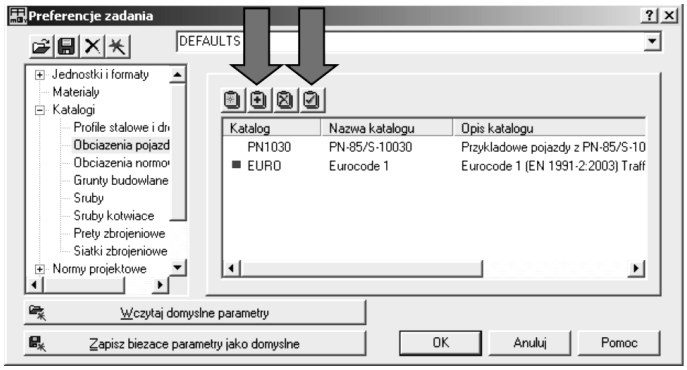
weryfikujemy ustawienia regionalne (***Narzędzia → Preferencje***):



ustalamy parametry projektu (***Narzędzia → Preferencje zadania***), sprawdzając czy w grupie *Normy projektowe* zostały ustawione aktualnie obowiązujące w Polsce normy:



a w grupie *Katalogi* podgrupa *Obciążenia pojazdami* jest zaznaczona jako bieżący katalog EC 1:



Gdyby katalog nie był widoczny na liście, należy go dodać z bazy przyciskiem +, a następnie ustawić jako bieżący przyciskiem ✔ (strzałki).

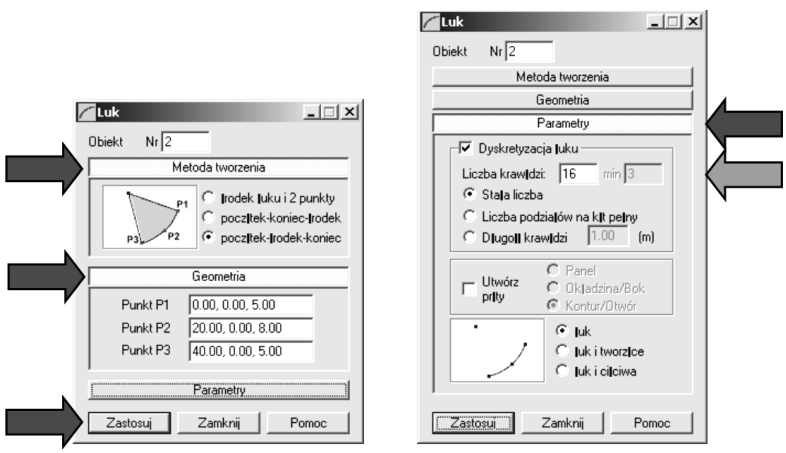
2. Osie konstrukcji

Osie konstrukcji (***Geometria → Osie konstrukcji***) wprowadzamy następująco:

– w kierunku ***X*** : 0,00; 5,00; 10,00; 15,00... 35,00; 40,00 m; styl numeracji 1, 2, 3,...
– w kierunku ***Y*** : 0,00; 3,50; 7,00 m; styl numeracji A, B, C,...
– w kierunku ***Z*** : 0,00; 5,00; 8,00 m styl numeracji *Definiuj* P1, P2, P3

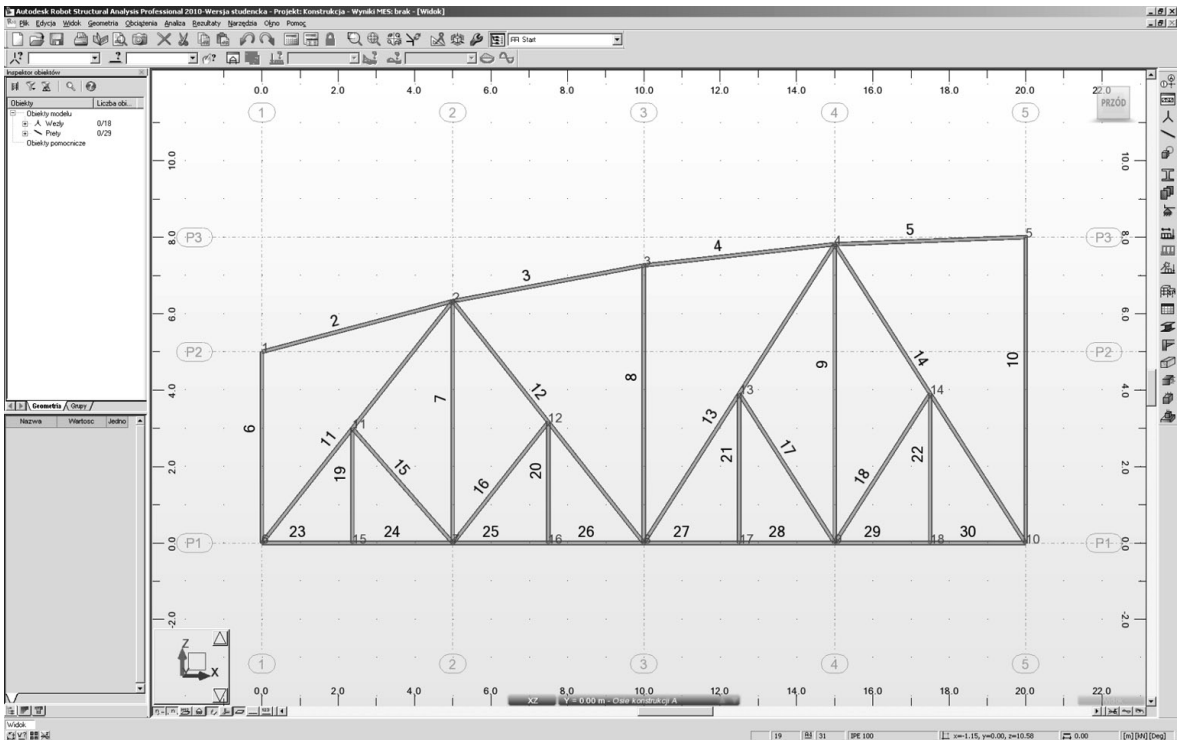
3. Geometria dźwigara

Tworzymy dźwigar kratowy o górnym pasie łukowym. Dla ułatwienia definicję dźwigara rozpoczniemy od wprowadzenia pomocniczego łuku (***Geometria → Obiekty → Łuk...***) przechodzącego przez punkty o współrzędnych **0,00**, **5,00**; **20,00**, **8,00**; **40,00**, **5,00** metodą **początek-środek-koniec**. Ze względu na dokładność odtworzenia geometrii obiektu ustalimy *Parametry* generacji łuku z liczbą krawędzi równą **16**:



Po wprowadzeniu wszystkich parametrów akceptujemy wybór przyciskiem *Zastosuj*.

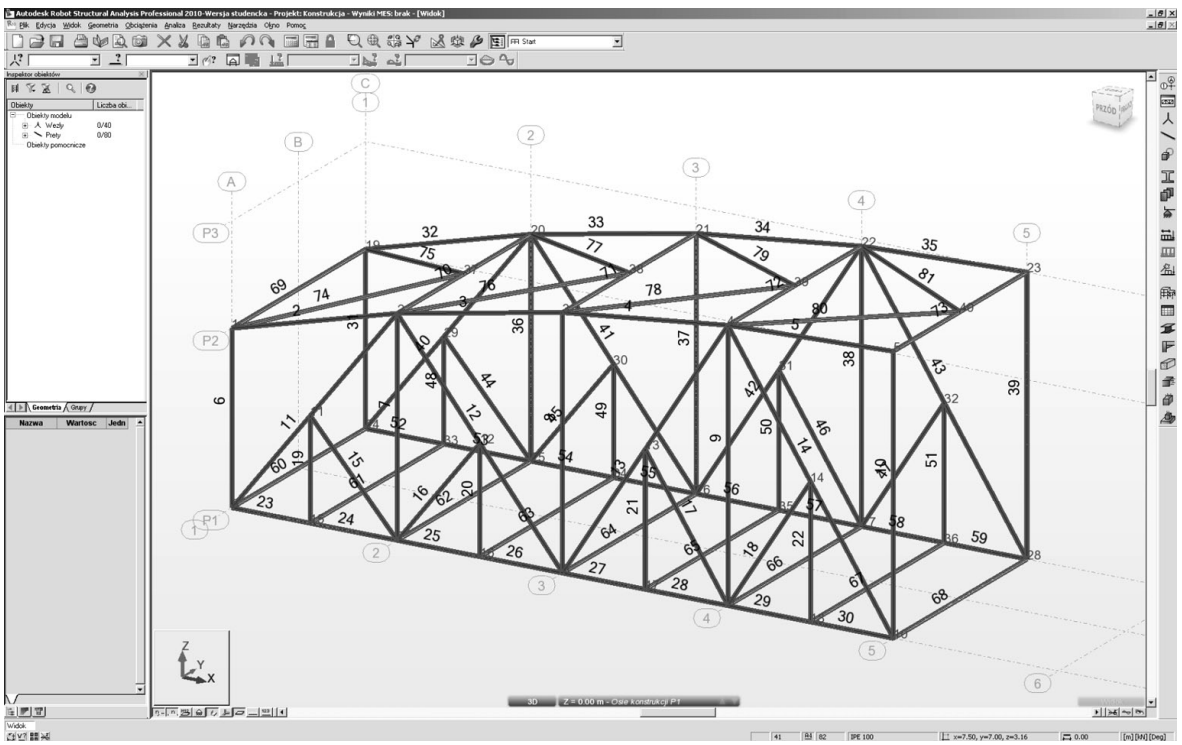
Tworzymy pas górny dźwigara, łącząc prętami punkty przecięcia łuku z poszczególnymi osiami pionowymi, poczynając od osi 1 aż do osi symetrii konstrukcji (oś 5) (***Geometria → Pręty...***).W celu przyspieszenia pracy możemy włączyć opcję ciągnięcie. W drugiej kolejności wprowadzamy słupki w osiach od 1 do 5, łączące pas górny z osią P1. Dalej wprowadzamy krzyżulce po przekątnych poszczególnych pól dźwigara głównego według rysunku poniżej oraz krzyżulce drugorzędne łączące środki krzyżulców podstawowych z dolnymi narożnikami pól. Na zakończenie definicji dźwigara głównego wprowadzamy słupki drugorzędne łączące punkty przecięcia krzyżulców z osią P1 oraz pas dolny w tej osi. Po wykonaniu wszystkich powyższych operacji konstrukcja winna wyglądać jak poniżej:



Tak utworzoną konstrukcję kopiujemy z płaszczyzny $Y = 0{,}00$ m na płaszczyznę $Y = 7{,}00$ m (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***) z wektorem translacji **0,00**; **7,00**; **0,00** m, pamiętając o wybraniu opcji **Kopiowanie** w grupie *Tryb edycji*.

Zmieniamy widok na trójwymiarowy (***Widok → Rzutowanie → 3d xyz***).

Pomiędzy parami naprzeciwległych węzłów pasów dolnych obydwu dźwigarów głównych wprowadzamy pręty poprzecznic. Podobnie pomiędzy parami naprzeciwległych węzłów pasów górnych obydwu dźwigarów wprowadzamy pręty stężeń i zastrzały usztywniające łączące końce jednego pręta stężenia ze środkiem pręta następnego. Po wykonaniu wszystkich powyższych operacji konstrukcja powinna wyglądać następująco:



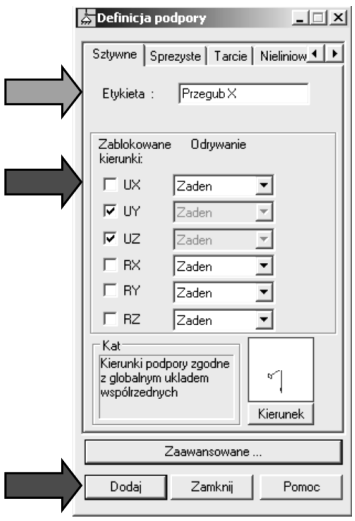
Zaznaczamy (myszą lub w oknie *Inspektora obiektów*) wszystkie pręty konstrukcji za wyjątkiem prętów leżących na osi symetrii (na rysunku są to pręty 10, 39, 68, 73). Dokonujemy lustrzanego odbicia tak zaznaczonej konstrukcji względem płaszczyzny symetrii w osi 5 (***Edycja → Edytuj → Lustro pionowe...***). Zważamy przy tym, aby w oknie dialogowym *Symetria pionowa*, które się wówczas pojawi wybrać płaszczyznę ***YZ***, jako położenie płaszczyzny podać wartość **20,00** i ustalić **Kopiowanie** jako *Tryb edycji*.

4. Kąt gamma

W sposób przedstawiony w *Ćwiczeniu 2* wszystkim prętom słupów, słupków i krzyżulców nadajemy kąt gamma równy **90°** (***Geometria → Charakterystyki → Kąt gamma...***).

5. Podpory

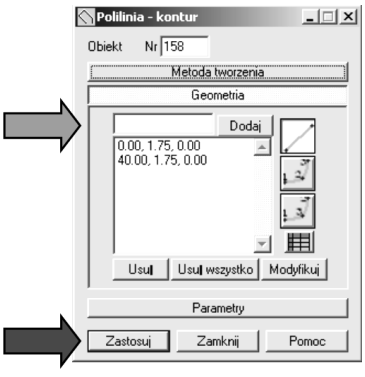
W skrajnych dolnych węzłach z lewej strony konstrukcji wprowadzamy podpory przegubowe (***Geometria → Podpory...***) w sposób przedstawiony w *Ćwiczeniu 1*. Ponadto do listy zdefiniowanych typów podpór dodajemy nowy typ, o nazwie **Podpora X** dopuszczający przesuw w kierunku osi *X* globalnego układu współrzędnych:



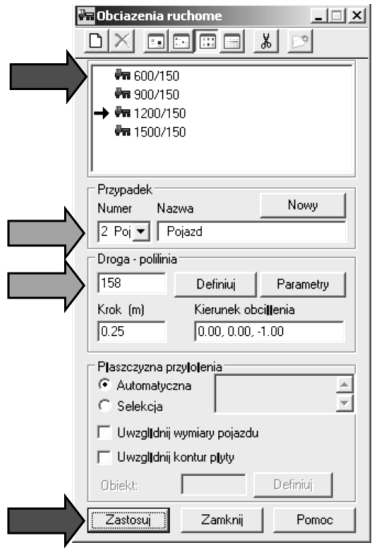
i wprowadzamy takie podpory w skrajnych dolnych węzłach z prawej strony konstrukcji.

6. Obciążenia

Rozważymy dwa przypadki obciążenia oddziałującego na naszą konstrukcję, obciążenie ciężarem własnym (***STA1***) oraz pojazdem specjalnym 120/1500 według EC1 (***Pojazd1***). Obciążenie ciężarem własnym definiujemy w sposób standardowy. Zdefiniowanie obciążenia pojazdem specjalnym wymaga wcześniejszego wyznaczenia trasy pojazdu w postaci polilinii (***Geometria → Obiekty → Polilinia - kontur...***). Przy jej definiowaniu w oknie dialogowym *Polilinia - kontur* koniecznie należy zmienić *Metodę tworzenia* na **Linia** lub **Polilinia**. W naszym zadaniu jako trasę pojazdu zdefiniujemy linię prostą łączącą punkty (**0,00**; **1,75**; **0,00**) i (**40,00**; **1,75**; **0,00**). Po wprowadzeniu danych zatwierdzamy je jak zwykle przyciskiem *Zastosuj*, a następnie zamykamy okno przyciskiem *Zamknij*.

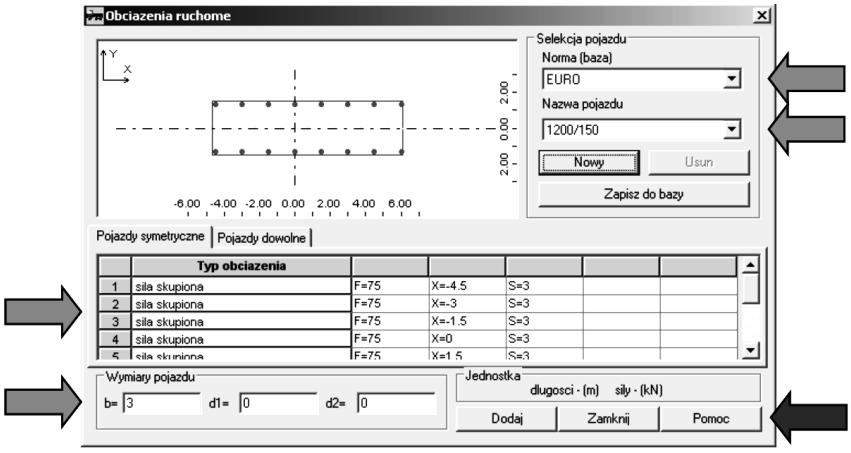


Po określeniu polilinii definiujemy obciążenie ruchome (***Obciążenia → Obciążenia specjalne → Ruchome...***). W oknie dialogowym *Obciążenia ruchome*:



wskazujemy interesujący nas typ obciążenia, wprowadzamy nazwę przypadku (**Pojazd1**), pod którą będzie występował na liście wszystkich przypadków obciążenia, drogę (w stosownym oknie wprowadzamy numer wcześniej zdefiniowanej polilinii będącej trajektorią ruchu pojazdu – w naszym przypadku jest to obiekt o numerze **158**), krok z jakim porusza się pojazd (standardowo program proponuje 1,00 metr, który zmienimy na **0,25** metra) i ewentualnie kierunek działania obciążenia (standardowo jest przyjmowany kierunek ***–Z***). Jak zwykle ustalenia akceptujemy przyciskiem *Zastosuj*.

W sytuacji gdyby na liście dialogowej w oknie *Obciążenia ruchome* nie było interesującego nas pojazdu lub też chcielibyśmy zdefiniować inny typ pojazdu, używamy przycisku oznaczonego symbolem kartki papieru. W oknie dialogowym, które się wówczas otworzy:



mamy możliwość wyboru nowego typu pojazdu spośród zdefiniowanych w normie lub określenia własnego (gabaryty, zestaw i rozmieszczenie obciążeń w obrębie gabarytów). Po wybraniu typu pojazdu przyciskiem *Dodaj* wprowadzamy go na listę wyboru w oknie dialogowym *Obciążenia ruchome*. Przyciskiem *Zamknij* zamykamy okno bez zapisywania zmian.

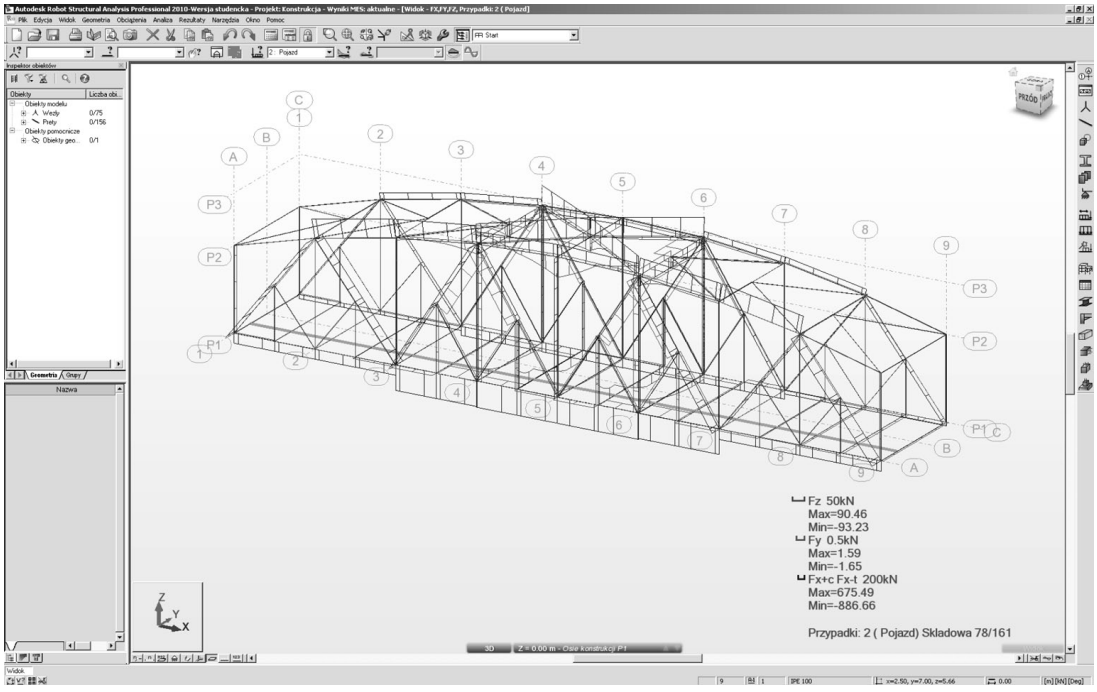
UWAGA: Obciążenia ruchome nie zostaną uwidocznione w tabeli obciążeń (***Widok → Tabele...***).

7. Obliczenia

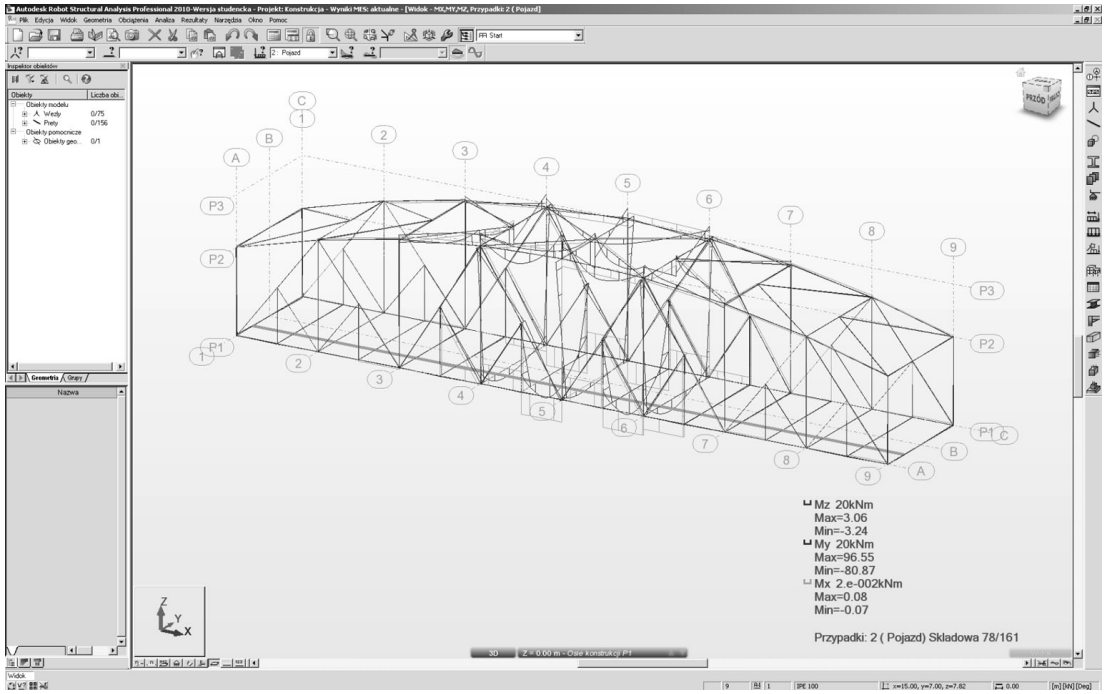
Skorzystamy z możliwości automatycznego wygenerowania kompletnego zestawu kombinacji (***Obciążenia → Kombinacje automatyczne...***). W oknie dialogowym *Kombinacje normowe przypadków* wybieramy opcję **Kombinacje automatyczne kompletne**.

8. Prezentacja wyników

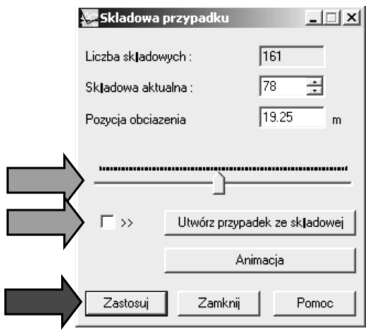
Wykorzystując polecenia poznane w trakcie wcześniejszych zajęć, możemy dokonać wizualizacji stanu naprężenia i przemieszczenia w konstrukcji będącego skutkiem przyłożonych obciążeń. I tak na przykład wartości sił przekrojowych w prętach konstrukcji dla centralnego położenia pojazdu w rozbiciu na siły (N_x, N_y, N_z) i momenty (M_x, M_y, M_z) wyglądają następująco:



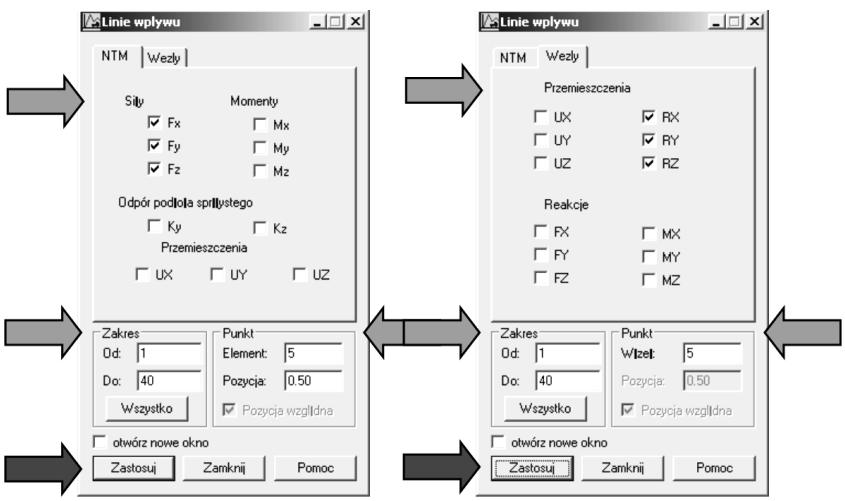
oraz



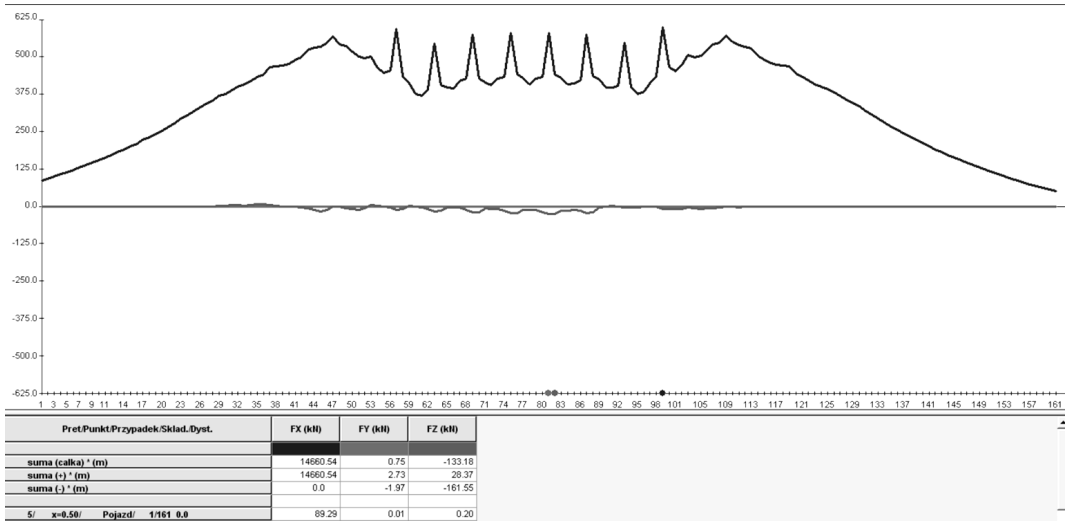
Jeżeli jednak jesteśmy zainteresowani siłami przekrojowymi pochodzącymi od obciążenia ruchomego w kolejnych stadiach jego ruchu po konstrukcji, możemy skorzystać z możliwości wizualizacji składowych przypadku (***Obciążenia → Wybierz składową przypadku...***). W oknie dialogowym *Składowa przypadku* możemy wybrać numer składowej (odpowiadający pozycji na trajektorii ruchu) za pomocą suwaka, utworzyć odrębny przypadek z wybranej składowej lub wszystkich składowych bądź utworzyć animację pokazującą ewolucję tych wielkości w trakcie ruchu pojazdu:



Ponadto w ramach opcji zaawansowanych mamy możliwość wizualizacji linii wpływu wybranych sił przekrojowych, przemieszczeń lub reakcji dla wskazanego pręta bądź węzła konstrukcji (***Rezultaty → Zaawansowane → Linia wpływu...***). W oknie dialogowym *Linia wpływu*, które się wówczas pojawi, na zakładce *NTM* (pręt) lub *Węzły* ustalamy, jakie wielkości uogólnione będą prezentowane (*Siły*, *Momenty*, *Przemieszczenia, Reakcje*), dla jakiego zakresu położeń obciążenia ruchomego (*Zakres*), w którym elemencie lub węźle (*Punkt*). W przypadku tworzenia linii wpływu dla pręta należy określić położenie względne (w układzie współrzędnych lokalnych) punktu analizy. Po ustaleniu wszystkich parametrów prezentacji zatwierdzamy je przyciskiem *Zastosuj*.



W wyniku zobaczymy linie wpływu pożądanych wielkości przekrojowych w postaci wykresu i zestawienia tabelarycznego. Na wykresie oprócz przebiegu zmienności wskazanych sił przekrojowych w funkcji odległości są zaznaczone punkty ekstremalne dla każdej prezentowanej wielkości, natomiast w zestawieniu tabelarycznym wartości, na podstawie których został sporządzony wykres są prezentowane w układzie punkt po punkcie. Krok, z jakim są one prezentowane jest równy krokowi, z jakim porusza się pojazd i jest ustalany w oknie dialogowym *Obciążenie ruchome*.

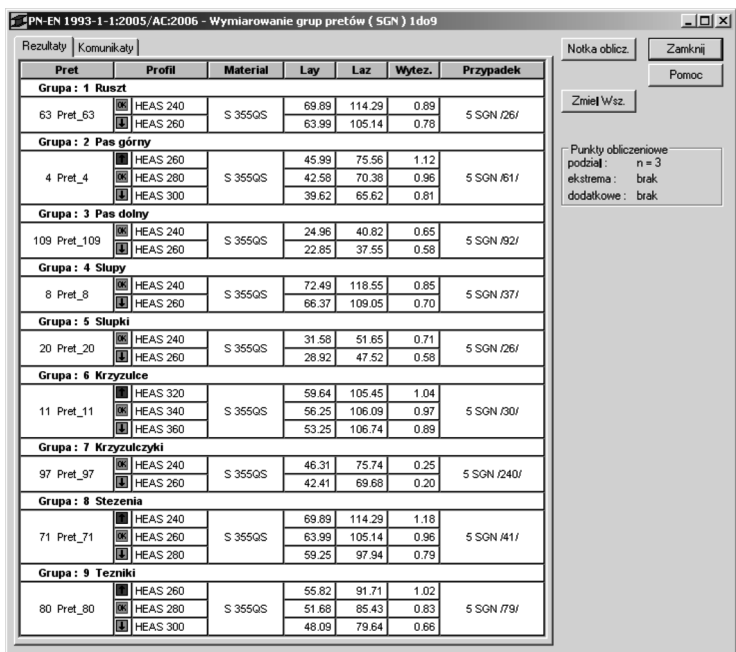


Pret/Punkt/Przypadek/Sklad./Dyst.	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)
suma (calka) * (m)	14660.54	0.75	-133.18
suma (+) * (m)	14660.54	2.73	28.37
suma (-) * (m)	0.0	-1.97	-161.55
S/ x=0.50/ Pojazd/ 1/161 0.0	89.29	0.01	0.20

9. Wymiarowanie

Po wyznaczeniu sił przekrojowych możemy przystąpić do weryfikacji nośności profili stalowych przyjętych w naszej konstrukcji. Rozpoczniemy tradycyjnie od przypisania poszczególnym prętom odpowiedniego typu elementu stalowego (***Geometria → Parametry normowe → Typ pręta stalowego/aluminiowego...***). Wszystkim prętom przypiszemy typ *Pręt*. Pręty konstrukcji podzielimy na dziewięć grup: pas górny, pas dolny, słupy, słupki (słupy drugorzędne), krzyżulce, krzyżulczyki (krzyżulce drugorzędne), poprzecznice (ruszt), stężenia i tężniki (zastrzały). We wszystkich grupach dopuścimy optymalizację profili w grupie HEAS (*Ćwiczenie 2*). Po wykonaniu wymiarowania grup prętów (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Obliczenia***) dla następującego zestawu opcji obliczeniowych:

wyniki powinny przedstawiać się następująco:



Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przypadek
Grupa : 1 Ruszt						
63 Pret_63	HEAS 240	S 355QS	69.89	114.29	0.89	5 SGN /26/
	HEAS 260		63.99	105.14	0.78	
Grupa : 2 Pas górny						
4 Pret_4	HEAS 260	S 355QS	45.99	75.56	1.12	5 SGN /61/
	HEAS 280		42.58	70.38	0.96	
	HEAS 300		39.62	65.62	0.81	
Grupa : 3 Pas dolny						
109 Pret_109	HEAS 240	S 355QS	24.96	40.82	0.65	5 SGN /92/
	HEAS 260		22.85	37.55	0.58	
Grupa : 4 Slupy						
8 Pret_8	HEAS 240	S 355QS	72.49	118.55	0.85	5 SGN /37/
	HEAS 260		66.37	109.05	0.70	
Grupa : 5 Slupki						
20 Pret_20	HEAS 240	S 355QS	31.58	51.65	0.71	5 SGN /26/
	HEAS 260		28.92	47.52	0.58	
Grupa : 6 Krzyzulce						
11 Pret_11	HEAS 320	S 355QS	59.64	105.45	1.04	5 SGN /30/
	HEAS 340		56.25	106.09	0.97	
	HEAS 360		53.25	106.74	0.89	
Grupa : 7 Krzyzulczyki						
97 Pret_97	HEAS 240	S 355QS	46.31	75.74	0.25	5 SGN /240/
	HEAS 260		42.41	69.68	0.20	
Grupa : 8 Stezenia						
71 Pret_71	HEAS 240	S 355QS	69.89	114.29	1.18	5 SGN /41/
	HEAS 260		63.99	105.14	0.96	
	HEAS 280		59.25	97.94	0.79	
Grupa : 9 Tezniki						
80 Pret_80	HEAS 260	S 355QS	55.82	91.71	1.02	5 SGN /79/
	HEAS 280		51.68	85.43	0.83	
	HEAS 300		48.09	79.64	0.66	

Jak widać przyjęte dotychczas profile prętów (IPE 100) muszą zostać zmienione. Ponieważ zmiana jest znacząca, należy oczekiwać, że uzyskanie ostatecznego rozwiązania projektowego przedstawionego problemu będzie wymagało kilkakrotnego przeprowadzenia operacji wymiarowania w grupach. Stosowne operacje zainteresowani mogą wykonać samodzielnie.

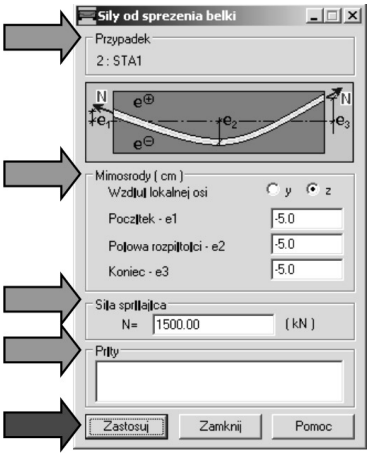
Ostateczne efekty pracy zapisujemy w pliku *Konstrukcja8.rtd* (***Plik → Zapisz projekt jako...***).

10. Sprężenie pasa dolnego

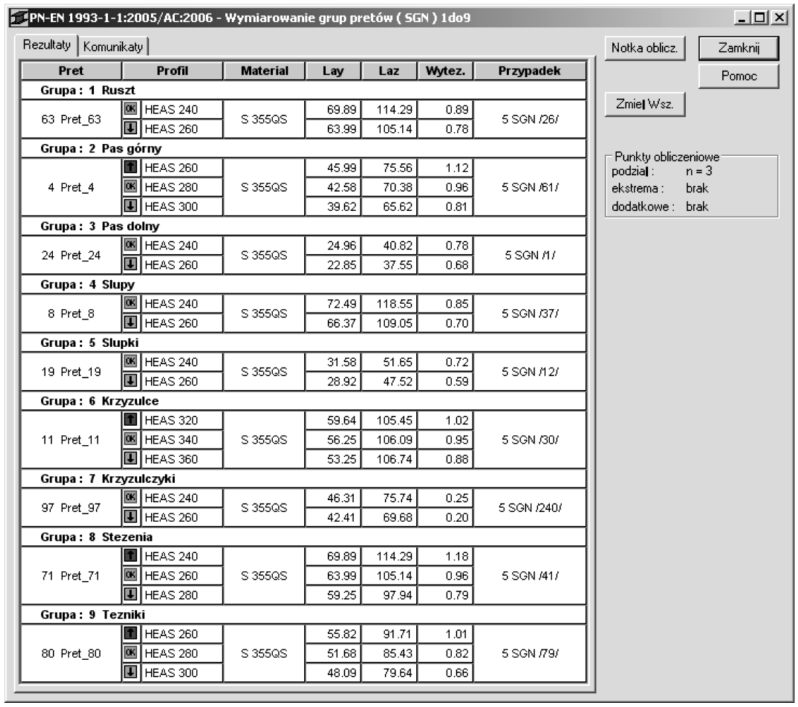
W celu zmniejszenia ugięć dźwigara pod wpływem przyłożonych obciążeń eksploatacyjnych wprowadzimy sprężenie pasa dolnego cięgnami. Przyjmiemy, że kable sprężające przebiegać będą na mimośrodzie 5,00 cm poniżej osi prętów pasa dolnego, przy czym pręty przypodporowe obydwu pasów nie będą sprężone. W kablach sprężających wprowadzimy siłę 1500 kN.

Obciążenie siłami sprężającymi, jako obciążenie stałe działające przez cały czas eksploatacji konstrukcji, możemy dołączyć do przypadku obciążenia ciężarem własnym, jeżeli mamy zamiar stosować w obu przypadkach taki sam mnożnik obciążenia. Jeżeli w przypadku obciążenia siłami sprężającymi chcemy zastosować inną wartość mnożnika obciążenia, musimy najpierw zdefiniować nowy przypadek obciążenia (***Obciążenia → Przypadki...***), a następnie do tego przypadku przypisać obciążenie pochodzące od sprężenia. W rozważanym zadaniu obciążenia siłami sprężającymi przypiszemy do przypadku obciążenia ciężarem własnym (***STA1***).

Aby zdefiniować obciążenia od sprężania po wybraniu właściwego przypadku obciążenia otwieramy okno dialogowe *Siły od sprężenia belki* (***Obciążenia → Obciążenia specjalne → Siły od sprężenia...***). W tym oknie przede wszystkim sprawdzamy, czy poprawnie wskazywana jest nazwa przypadku obciążenia, do którego ma zostać przypisane obciążenie siłami sprężającymi, następnie wprowadzamy wielkości mimośrodów na początku, w środku i na końcu pręta równe **–5,0** cm oraz wielkość siły sprężającej **1500** kN. Po zdefiniowaniu parametrów obciążenia, w oknie *Pręty* wprowadzamy numery elementów prętowych, które zostały poddane temu obciążeniu:



Po zdefiniowaniu nowego obciążenia możemy sprawdzić poprawność jego definicji w tabeli obciążeń (***Obciążenia → Tabela obciążeń***), a następnie wykonać obliczenia (***Analiza → Obliczenia***). Dalej w znany już sposób możemy dokonać wizualizacji wyników oraz wymiarowania grup prętów (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Obliczenia***) dla zestawu opcji obliczeniowych identycznego z rozważanym powyżej. Wyniki powinny przedstawiać się następująco:



Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przypadek
Grupa : 1 Rusztt						
63 Pret_63	HEAS 240	S 355QS	69.89	114.29	0.89	5 SGN /26/
	HEAS 260		63.99	105.14	0.78	
Grupa : 2 Pas górny						
4 Pret_4	HEAS 260	S 355QS	45.99	75.56	1.12	5 SGN /61/
	HEAS 280		42.58	70.38	0.96	
	HEAS 300		39.62	65.62	0.81	
Grupa : 3 Pas dolny						
24 Pret_24	HEAS 240	S 355QS	24.96	40.82	0.78	5 SGN /1/
	HEAS 260		22.85	37.55	0.68	
Grupa : 4 Słupy						
8 Pret_8	HEAS 240	S 355QS	72.49	118.55	0.85	5 SGN /37/
	HEAS 260		66.37	109.05	0.70	
Grupa : 5 Słupki						
19 Pret_19	HEAS 240	S 355QS	31.58	51.65	0.72	5 SGN /12/
	HEAS 260		28.92	47.52	0.59	
Grupa : 6 Krzyzulce						
11 Pret_11	HEAS 320	S 355QS	59.64	105.45	1.02	5 SGN /30/
	HEAS 340		56.25	106.09	0.95	
	HEAS 360		53.25	106.74	0.88	
Grupa : 7 Krzyzulczyki						
97 Pret_97	HEAS 240	S 355QS	46.31	75.74	0.25	5 SGN /240/
	HEAS 260		42.41	69.68	0.20	
Grupa : 8 Stezenia						
71 Pret_71	HEAS 240	S 355QS	69.89	114.29	1.18	5 SGN /41/
	HEAS 260		63.99	105.14	0.96	
	HEAS 280		59.25	97.94	0.79	
Grupa : 9 Tezniki						
80 Pret_80	HEAS 260	S 355QS	55.82	91.71	1.01	5 SGN /79/
	HEAS 280		51.68	85.43	0.82	
	HEAS 300		48.09	79.64	0.66	

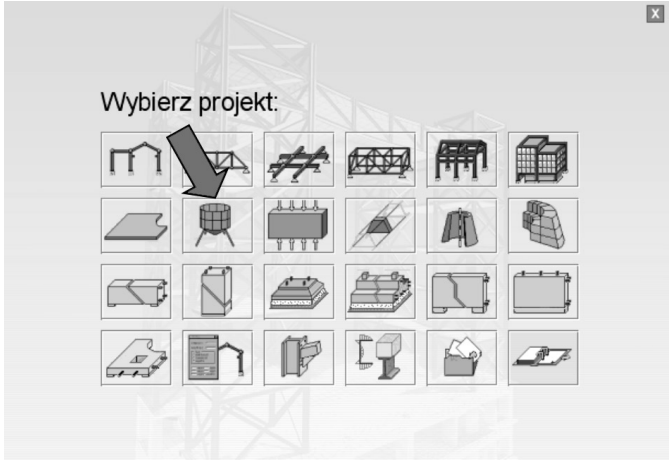
UWAGA: W bieżącej wersji programu możliwe jest zadanie mimośrodu tylko na początku, w środku i na końcu elementu skończonego, do którego przyłożone jest obciążenie od sprężenia.

Ostateczne efekty pracy po modyfikacji konstrukcji zapisujemy w pliku *Konstrukcja9.rtd* (***Plik → Zapisz projekt jako...***).

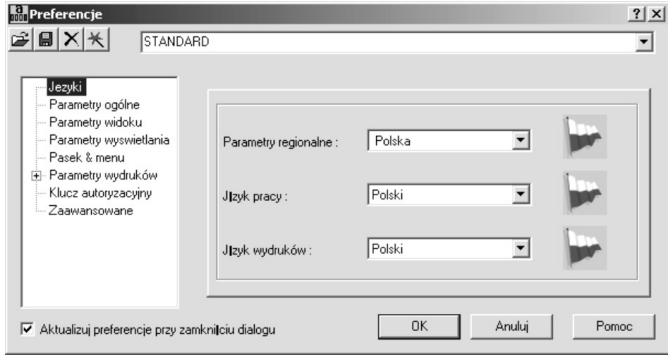
Ćwiczenie 9
Obciążenie dynamiczne – analiza czasowa 3D

Nowe polecenia: Analiza modalna, Analiza dynamiczna

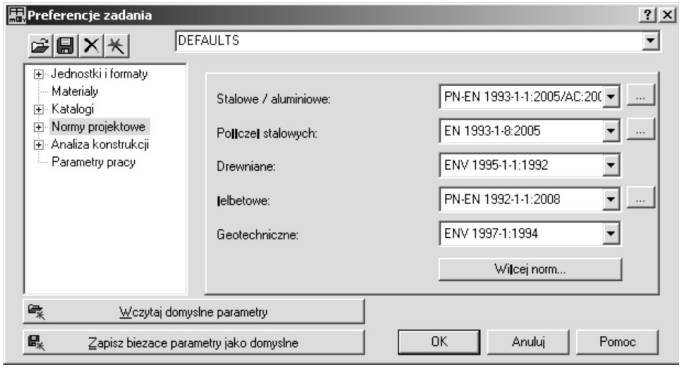
1. Konfiguracja programu
Wybieramy typ zadania – projektowanie powłoki



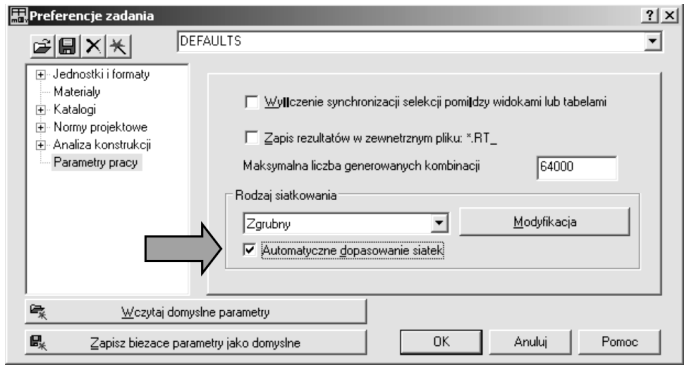
weryfikujemy ustawienia regionalne (***Narzędzia → Preferencje***):



ustalamy parametry projektu (***Narzędzia → Preferencje zadania***), sprawdzając czy w grupie *Normy projektowe* zostały ustawione aktualnie obowiązujące w Polsce normy:



ponadto w grupie *Parametry pracy* włączamy opcję **Automatyczne dopasowanie siatek**:



2. Osie konstrukcji

Osie konstrukcji (***Geometria → Osie konstrukcji***) w układzie ***walcowym*** wprowadzamy następująco:

– w kierunku ***R*** : 0,00; 0,60; 3,00 m; styl numeracji 1, 2, 3,...
– w kierunku **Φ** : 0,0; 120,0; 240,0; 360,0°; styl numeracji A, B, C,...
– w kierunku ***Z*** : 0,00; 10,00; 20,00; 30,00 m; styl numeracji *Definiuj* P1, P2, P3, P4

3. Geometria konstrukcji

Tworzymy stalowy komin o wysokości 30,00 m zamocowany w fundamencie i dodatkowo wsparty, za pośrednictwem pierścienia wzmacniającego, na wysokości 10,00 m ponad poziomem fundamentu trzema zastrzałami rozmieszczonymi w planie pod kątem 120°.

4. Geometria pierścienia wzmacniającego i zastrzałów

Wprowadzamy pierścień wzmacniający na wysokości 10,00 m ponad poziomem podparcia komina jako miejsce oparcia zastrzałów. W tym celu tworzymy okrąg o promieniu **0,60** m i środku w punkcie o współrzędnych **0,00; 0,00; 10,00** m metodą **środek–promień**. Okrąg leży w płaszczyźnie ***XY***. Ze względu na konieczność połączenia pierścienia wzmacniającego z płaszczem komina ustalamy dyskretyzację z liczbą krawędzi równą **12** i włączamy opcję **Utwórz pręty** (*Ćwiczenie 7*).

Wprowadzamy trzy zastrzały łączące węzły pierścienia leżące na południkach 120°, 240° i 360° z punktami leżącymi na tych samych południkach w odległości 3,00 m od osi pionowej komina w poziomie terenu.

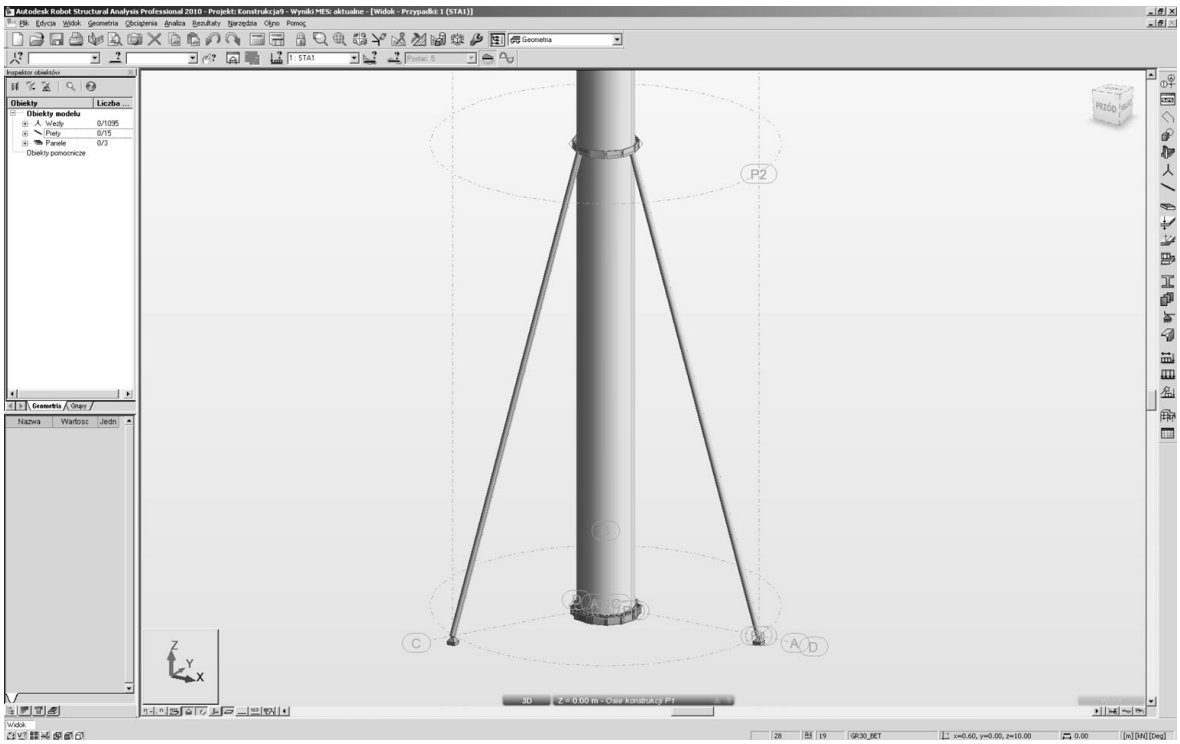
W znany sposób (*Ćwiczenie 1*) na listę aktywnych profili prętów wprowadzamy profile **RO 70x5** i **HEBT 200**, które zostaną zastosowane w projektowanej konstrukcji (***Geometria → Charakterystyki → Profile prętów...***). Oczywiście pierścieniowi (numery elementów skończonych od 1 do 12) przypisujemy profil **HEBT 200**, natomiast zastrzałom profil **RO 70x5**. Jak zawsze do szybkiego wyboru odpowiedniej grupy obiektów można wykorzystać okno *Inspektora obiektów* (***Okno → Okno inspektora***). Wszystkim prętom występującym w konstrukcji, podobnie jak płaszczowi komina, przypisujemy materiał Stal S355 (***Geometria → Materiały...***).

5. Kąt gamma

Wszystkim prętom pierścienia wzmacniającego nadajemy kąt gamma równy **90°** w sposób przedstawiony w Ćwiczeniu 2 (***Geometria → Charakterystyki → Kąt gamma...***).

6. Offsety

Tym samym prętom nadajemy offsety w taki sposób, aby na osi pręta obliczeniowego znalazła się półka dolna (***Geometria → Cechy dodatkowe → Offsety...***). Odpowiada to takiemu ułożeniu profilu HEBT, w którym krawędź środnika znajdzie się na powierzchni płaszcza komina (szczegóły w *Ćwiczeniu 4* i *Ćwiczeniu 7*).



7. Geometria płaszcza komina

Definicję komina rozpoczniemy od utworzenia walca opartego na okręgu o środku w początku układu współrzędnych, promieniu 0,60 m i wysokości 10,00 m (***Geometria → Obiekty → Walec...***). Wybieramy metodę tworzenia **środek–promień**, wprowadzamy *Punkt P* (**0,00**; **0,00**; **0,00**), *Promień* (**0,60**; **0,00**; **0,00**), *Wysokość* (**0,00**; **0,00**; **10,00**) i wybieramy ***XY*** jako płaszczyznę podstawy. Parametry generacji pobocznicy walca ustalamy następująco: *Liczba krawędzi* równa **12**, *Podział boku* na **30** części. Przy takim podziale elementy skończone utworzone na pobocznicy walca będą miały kształt zbliżony do kwadratu o boku 30 cm. Wyłączamy opcje **Przykrycie** i **Dno**, a wybór zatwierdzamy przyciskiem *Zastosuj* (*Ćwiczenie 7*). Utworzoną sekcję komina kopiujemy dwukrotnie (***Edycja → Edytuj → Przesuń...***). W oknie dialogowym *Translacja* wprowadzamy *Wektor translacji (m)* **0,00**; **0,00**; **10,00**, *Tryb edycji* **Kopiowanie** i *Liczba powtórzeń* **2**. Wprowadzone dane zatwierdzamy przyciskiem *Wykonaj*. Panelom przypisujemy grubość **0,5** cm (***Geometria → Charakterystyki → Grubość...***).

8. Podpory

W dolnych węzłach zastrzałów wprowadzamy podpory przegubowe (***Geometria → Podpory...***) w sposób prezentowany w *Ćwiczeniu 1*. Na dolnej krawędzi płaszcza komina narzucamy podporę liniową w postaci utwierdzenia (***Geometria → Podpory...***).

Po wykonaniu wszystkich wymienionych operacji, włączeniu opcji wizualizacji offsetów, podpór i paneli (***Widok → Wyświetl...***), dolna część konstrukcji winna wyglądać jak przedstawiono powyżej.

9. Obciążenia

Rozważymy trzy przypadki obciążenia (***Obciążenia → Przypadki...***): ciężarem własnym (***STA1***), generowany automatycznie, i dwa przypadki obciążenia wiatrem (***WIATR1*** i ***WIATR2***). Obydwa przypadki obciążenia wiatrem zadajemy na zakładce *Powierzchnia* okna dialogowego *Obciążenie* (***Obciążenia → Definicja obciążeń...***) jako *Obciążenie powierzchniowe jednorodne*. W przypadku ***WIATR1*** przyjmujemy jednorodne parcie wiatru na całej wysokości komina, o intensywności p = **0,33** kPa, działające w kierunku osi ***X*** globalnego układu współrzędnych, natomiast w przypadku ***WIATR2*** przyjmujemy takie samo obciążenie, ale działające w kierunku osi ***Y*** globalnego układu współrzędnych.

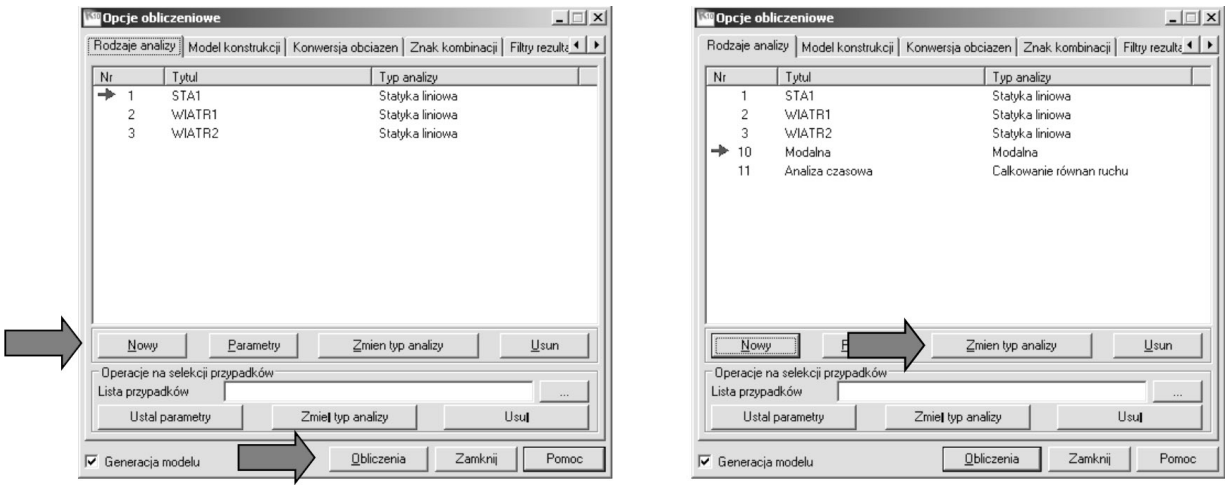
10. Siatka obliczeniowa MES

Siatkę obliczeniową MES dla paneli tworzących płaszcz tworzymy automatycznie (***Analiza → Model obliczeniowy → Generacja***) przy typowym ustawieniu parametrów generacji, zważając, aby w chwili rozpoczyna-

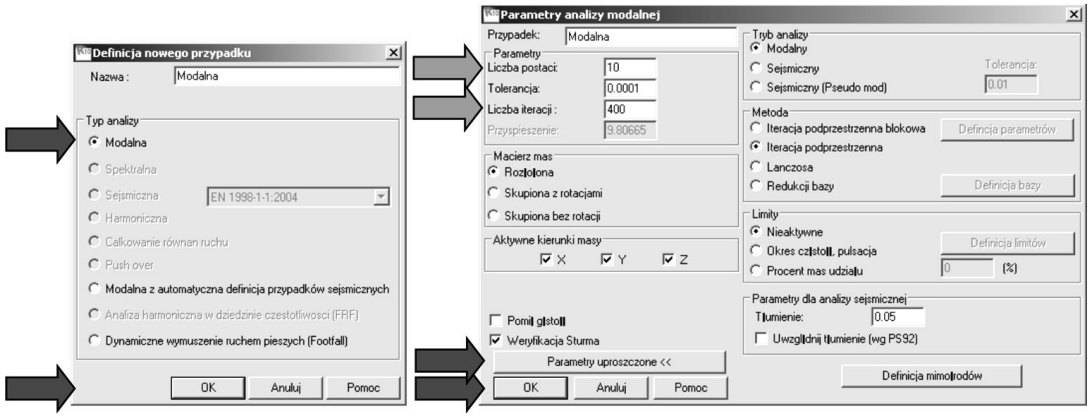
nia generacji nie był zaznaczony żaden panel. Dla uniknięcia regeneracji bądź ewentualnych niezamierzonych modyfikacji siatki możemy ją zamrozić (***Analiza → Model obliczeniowy → Zamrożenie siatki***).

11. Przygotowanie analizy dynamicznej

Przeprowadzenie analizy dynamicznej, rozumianej jako wyznaczenie odpowiedzi konstrukcji na zmieniające się w czasie obciążenie, w programie ***Robot*** odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie należy przeprowadzić analizę modalną konstrukcji (wyznaczenie podstawowych częstości i odpowiadających im form drgań własnych). W drugim, właściwym etapie analizy dokonuje się wyznaczenia dynamicznej odpowiedzi konstrukcji na zadany program obciążenia. Wprowadzenia nowego zadania do analizy dokonuje się w oknie *Opcje obliczeniowe* (***Analiza → Rodzaje analizy...***) na zakładce *Rodzaje analizy*:



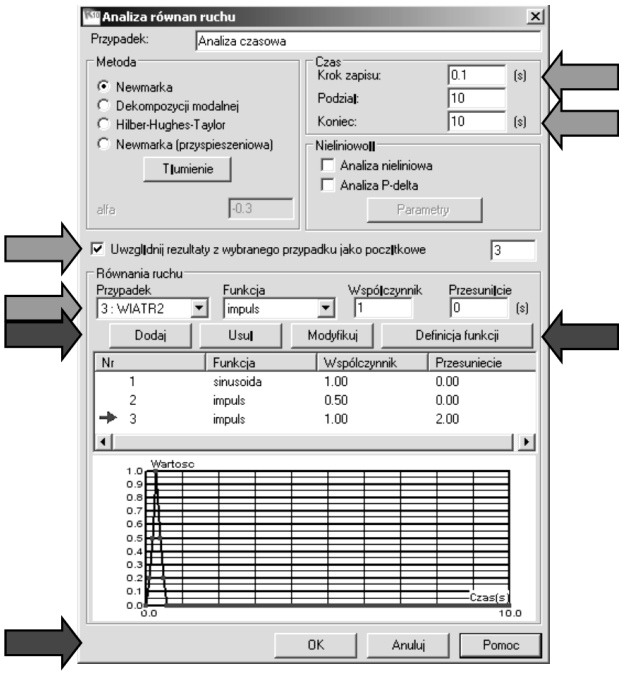
Po wciśnięciu przycisku *Nowy* pojawi się okno dialogowe *Definicja nowego przypadku*, w którym wybieramy typ rozwiązywanego problemu. Jeżeli wcześniej na listę rozwiązywanych przypadków nie zostało wprowadzone zadanie analizy modalnej (lewy rysunek powyżej) okno to wygląda jak niżej:



Po zaakceptowaniu wybranego typu analizy przyciskiem *OK* w nowym oknie dialogowym o nazwie *Parametry analizy modalnej*, które się wówczas pojawi, mamy możliwość wprowadzenia parametrów tej analizy, podzielonych na dwie grupy: parametrów uproszczonych, takich jak liczba wyznaczanych częstości i postaci drgań własnych, tolerancja zbieżności i dopuszczalna liczba iteracji w poszukiwaniu wartości własnych oraz parametrów zawansowanych, takich jak tryb analizy czy metoda rozwiązywania problemu własnego. Opcje zaawansowane są dostępne po skorzystaniu z przycisku *Parametry zaawansowane* (strzałka). Jak zwykle nowe ustawienia akceptujemy przyciskiem *OK*.

Po ponownym wciśnięciu przycisku *Nowy* pojawi się to samo okno dialogowe *Definicja nowego przypadku*, ale tym razem dostępne będą wszystkie typy analizy. W celu przeprowadzenia interesującej nas analizy dynamicznej wybieramy opcję *Całkowanie równań ruchu*:

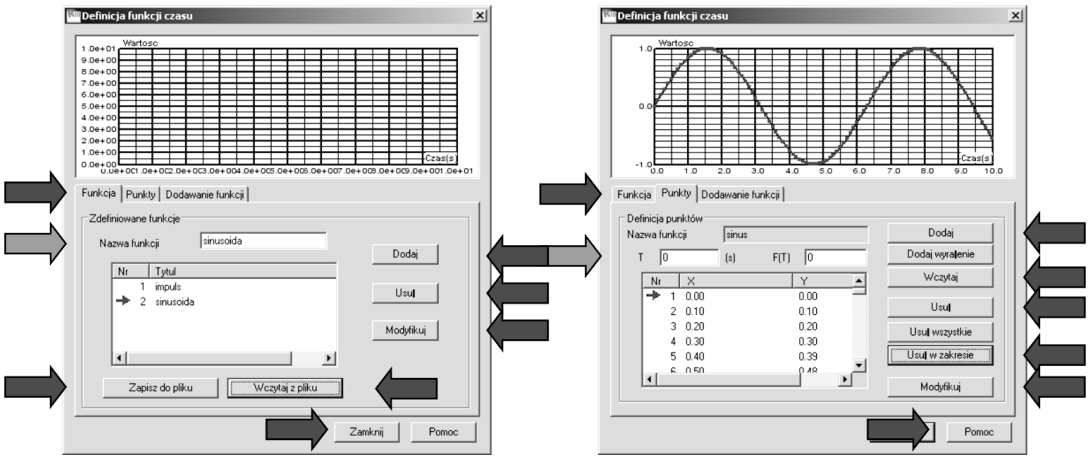
Po zatwierdzeniu wyboru przyciskiem OK pojawi się okno dialogowe *Analiza równań ruchu*:



w którym definiujemy parametry właściwej analizy dynamicznej, takie jak metoda całkowania, czas analizy (w tym krok czasowy co jaki będą zapisywane wyniki tej analizy) i dane podstawowe dla każdego komponentu wymuszenia, czyli przypadek obciążenia, który będzie jego podstawą, funkcję opisującą przebieg tego komponentu wymuszenia w czasie, jego mnożnik i przesunięcie fazowe (opóźnienie momentu rozpoczęcia działania w stosunku do chwili rozpoczęcia analizy). Po ustaleniu danych podstawowych komponentu w czterech poziomych oknach wskazanych strzałką, aktywujemy je za pomocą przycisku *Dodaj*. Możemy zdefiniować dowolną liczbę komponentów analizy dynamicznej. Każdy z nich w dowolnym momencie, po wskazaniu kursorem myszy, co zostanie potwierdzone znakiem czerwonej strzałki, możemy zmienić (*Modyfikuj*) bądź usunąć (*Usuń*).

Ponadto możemy zadecydować czy analizowanej konstrukcji zostaną nadane wstępne deformacje pochodzące od wybranego przypadku obciążenia (*Uwzględnij rezultaty z wybranego przypadku obciążenia*). Jeżeli tak, to numer przypadku wprowadzamy w oknie po prawej stronie napisu.

Przebieg czasowy funkcji wymuszenia, której nazwa widoczna jest w oknie listy wyboru *Funkcja*, jest prezentowany w oknie graficznym w dolnej części okna dialogowego. Przebieg funkcji wymuszenia wprowadzamy na listę wyboru za pomocą przycisku *Definicja funkcji*. Po jego użyciu otwiera się nowe okno dialogowe *Definicja funkcji czasu*, w którym możemy określić przebieg naszej funkcji na dwa sposoby: podając przepis analityczny funkcji zmiennej *T* (czas) (dopuszczalne są cztery podstawowe operacje arytmetyczne, potęgowanie, podstawowe funkcje trygonometryczne SIN, COS, TG i ARCTG oraz pierwiastek kwadratowy SQRT) lub wprowadzając (ręcznie bądź z pliku tekstowego) zbiór par liczb w układzie czas–amplituda.



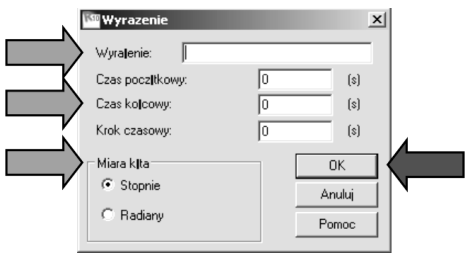
Pierwszy etap wprowadzania funkcji wymuszenia jest w każdym przypadku identyczny (lewy rysunek powyżej). W oknie dialogowym *Definicja funkcji czasu* w jedynej dostępnej zakładce *Funkcja* w oknie tekstowym *Nazwa funkcji* wprowadzamy stosowną nazwę, z którą będzie skojarzony nasz przebieg czasowy, następnie przyciskiem *Dodaj* wprowadzamy tę nazwę na listę wyboru. W ten sposób na listę wyboru możemy wprowadzić kilka nazw funkcji, spośród których kursorem myszy wskazujemy jedną (oznaczoną w oknie czerwoną strzałką), dla której będziemy podawać dalsze dane. Po wprowadzeniu przynajmniej jednej nazwy funkcji na listę wyboru, w oknie dialogowym *Definicja funkcji czasu* ujawnią się dwie dodatkowe zakładki: *Punkty* i *Dodawanie funkcji*.

Drugi etap postępowania zależy od tego, czy wprowadzamy funkcję wymuszenia „ręcznie", czy z pliku tekstowego, czy też w postaci przepisu funkcyjnego (prawy rysunek powyżej).

W przypadku gdy wprowadzamy funkcję wymuszenia w postaci par współrzędnych, na zakładce *Punkty* punkt po punkcie w oknach tekstowych *T* i *F(T)* wprowadzamy wartości czasu i amplitudy, za każdym razem akceptując je przyciskiem *Dodaj*. Wprowadzane wartości są od razu prezentowane na wykresie w górnej części okna dialogowego i na liście w oknie tekstowym.

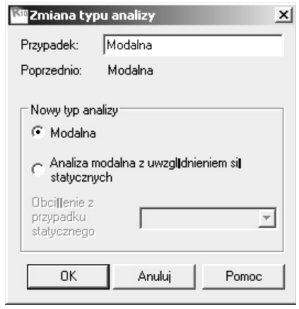
Jeżeli funkcja wymuszenia jest zapisana w pliku tekstowym w układzie jeden punkt (para T, $F(T)$) w wierszu, to możemy ją wczytać na zakładce *Funkcja* za pomocą przycisku *Wczytaj z pliku*, który otwiera standardowe okno systemu operacyjnego *Otwórz plik*.

Trzecią możliwością wprowadzenia funkcji wymuszenia jest definicja w postaci przepisu funkcyjnego. Wprowadza się ją za pomocą przycisku *Dodaj wyrażenie* na zakładce *Punkty*. Użycie tego przycisku powoduje otwarcie okna dialogowego *Wyrażenie*:



w którym wprowadzamy przepis funkcji (*Wyrażenie*), czasy początkowy i końcowy, krok dyskretyzacji przedziału czasowego oraz miarę kąta. Wprowadzone dane akceptujemy przyciskiem *OK*.

W każdym przypadku wprowadzone wartości, widoczne na liście wyboru, można edytować za pomocą przycisków *Usuń*, *Usuń wszystkie*, *Usuń w zakresie*, *Modyfikuj* bądź zapisać w pliku dyskowym, używając przycisku *Zapisz do pliku*, otwierającego standardowe okno dialogowe systemu operacyjnego *Otwórz plik*, a dostępnego na zakładce *Funkcja*. Wprowadzone zmiany akceptujemy przyciskiem *Zamknij*, co skutkuje powrotem do okna dialogowego *Opcje obliczeniowe*. W oknie tym, po wskazaniu kursorem myszy przypadku analizy modalnej, co zostanie potwierdzone ciemnoszarą strzałką (prawy rysunek u góry strony 110), możemy dokonać modyfikacji jej typu, używając przycisku *Zmień typ analizy*. W oknie dialogowym *Zmiana typu analizy*, które się wówczas pojawi:



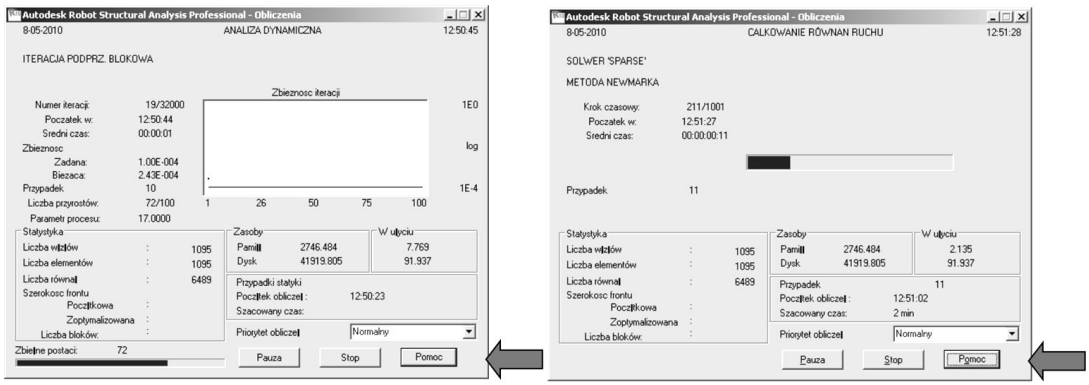
można zmienić wybrane parametry analizy modalnej, zatwierdzając wybór przyciskiem *OK*.

Okno *Opcje obliczeniowe* zamykamy przyciskiem *Zamknij* (tylko zamyka okno) lub *Obliczenia* (zamyka okno i rozpoczyna obliczenia).

12. Obliczenia

Kompletny zestaw kombinacji generujemy automatycznie (***Obciążenia → Kombinacje automatyczne...***). W oknie dialogowym *Kombinacje normowe przypadków* wybieramy opcję *Kombinacje automatyczne kompletne*. W trakcie obliczeń (***Analiza → Obliczenia***) najpierw rozwiązywane są zadania statyki, następnie zadanie analizy modalnej, a na końcu zadanie analizy czasowej.

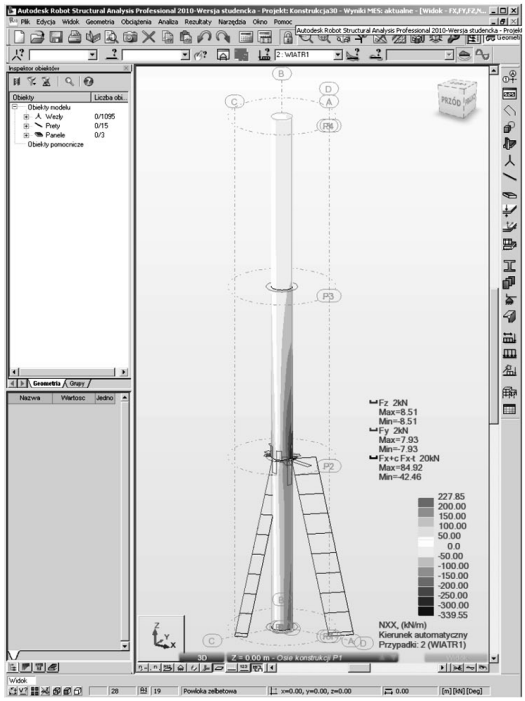
Podczas prowadzenia analizy modalnej (*Analiza dynamiczna*) na ekranie widoczne jest okno dialogowe (lewy rysunek poniżej) zawierające krótkie podsumowanie ustawień najważniejszych opcji obliczeniowych użytych w trakcie tej analizy i stopnia wykorzystania zasobów systemowych oraz pasek stanu zaawansowania prac. W każdej chwili analizę można zawiesić (przyciskiem *Pauza*) lub przerwać (przyciskiem *Stop*).

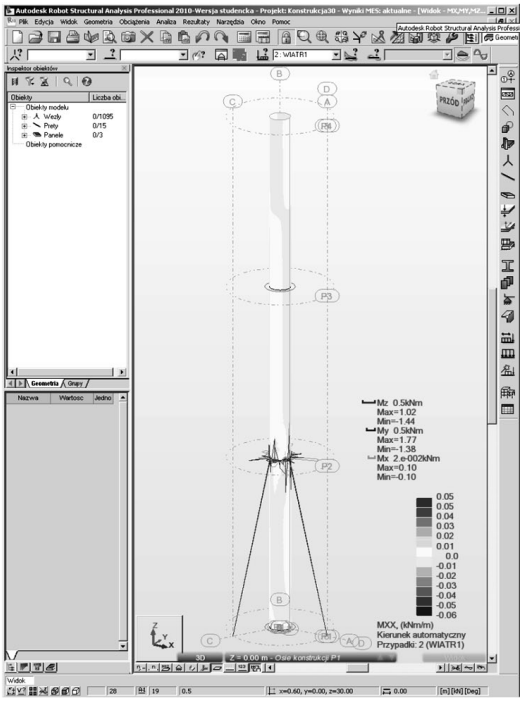


Po poprawnym zakończeniu analizy modalnej uruchamiana jest analiza dynamiczna (*Całkowanie równań ruchu*). W czasie tej analizy na ekranie widoczne jest okno dialogowe (prawy rysunek powyżej) prezentujące, tak jak w przypadku analizy modalnej, krótkie podsumowanie opcji obliczeniowych użytych w trakcie analizy i stopnia wykorzystania zasobów systemowych oraz pasek stanu zaawansowania prac. Tak jak poprzednio, w każdej chwili analizę można zawiesić (przyciskiem *Pauza*) lub przerwać (przyciskiem *Stop*).

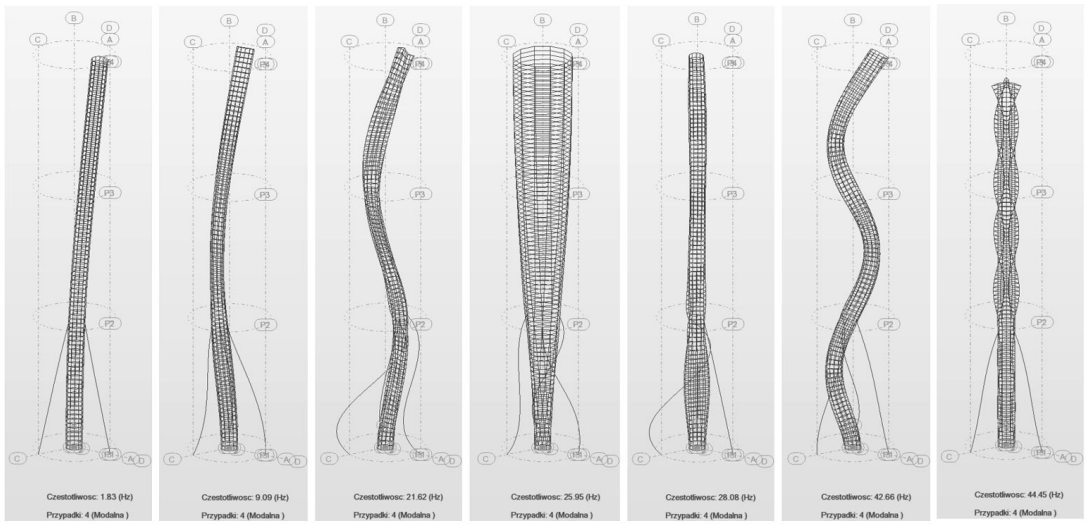
13. Prezentacja wyników

Wykorzystując polecenia poznane w trakcie wcześniejszych zajęć, możemy dokonać wizualizacji stanu naprężenia i przemieszczenia w konstrukcji będącego skutkiem przyłożonych obciążeń we wszystkich przypadkach analizy statycznej. I tak na przykład możemy przedstawić wartości sił przekrojowych w konstrukcji dla wiatru wiejącego w kierunku osi *X* globalnego układu współrzędnych w rozbiciu na siły (N_x, N_y, N_z, N_{xx}) i momenty (M_x, M_y, M_z, M_{xx}):



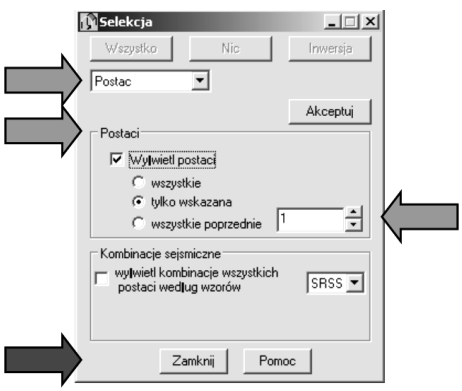


Jeżeli jesteśmy zainteresowani postaciami i odpowiadającymi im częstościami drgań własnych, takimi jak poniższe, które zostały wyznaczone dla rozważanej w tym przykładzie konstrukcji:



możemy skorzystać z możliwości wizualizacji form drgań (***Obciążenia → Wybierz formy drgań...***).

W oknie dialogowym *Selekcja*, które się wówczas pojawi:

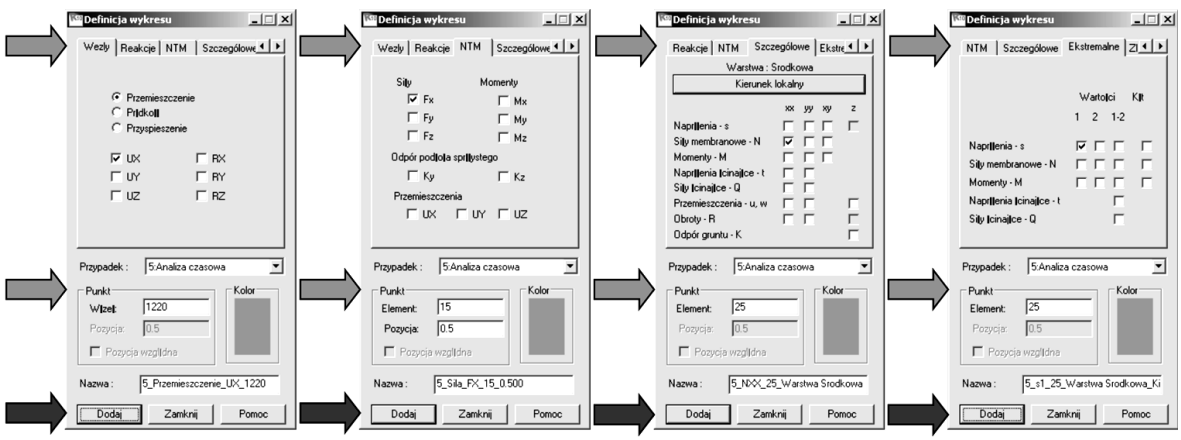


wskazujemy numer postaci drgań własnych, która ma zostać zaprezentowana. Postaci te są posortowane w kolejności od odpowiadającej najniższej częstości drgań własnych, w kierunku wzrostu tych wartości. Aby zobaczyć obraz graficzny formy drgań, na zakładce *Deformacje* okna dialogowego *Mapy* (***Rezultaty → Mapy...***) włączamy prezentację deformacji. Gdyby wizualizacja była nieczytelna, możemy zmienić skalę prezentowania deformacji przyciskami *Skala* +, *Skala* –, *Normalizuj*. Ustawienia akceptujemy przyciskiem *Zastosuj*.

Jeżeli w końcu jesteśmy zainteresowani siłami przekrojowymi pochodzącymi od obciążenia zmiennego w czasie (dynamicznego) w kolejnych chwilach czasu, skorzystamy z możliwości wizualizacji składowych przypadku (***Obciążenia → Wybierz składową przypadku...***). W oknie dialogowym *Składowa przypadku*, identycznie jak w przypadku analizy obciążenia ruchomego (patrz *Ćwiczenie 8*), możemy wybrać numer składowej (odpowiadający numerowi przyrostu czasowego) za pomocą suwaka, utworzyć odrębny przypadek z wybranej składowej lub wszystkich składowych bądź utworzyć animację pokazującą ewolucję tych wielkości z upływem czasu. Animacja jest szczególnie dogodnym narzędziem wstępnej analizy ewolucji obserwowanych wielkości w czasie.

W ramach opcji zaawansowanych mamy możliwość wizualizacji ewolucji w czasie wybranych sił przekrojowych, przemieszczeń lub reakcji dla wskazanego pręta, węzła bądź elementu skończonego konstrukcji (***Rezultaty → Zaawansowane → Analiza czasowa – Wykresy...***). W oknie dialogowym *Równanie ruchu*, które się wówczas pojawi:

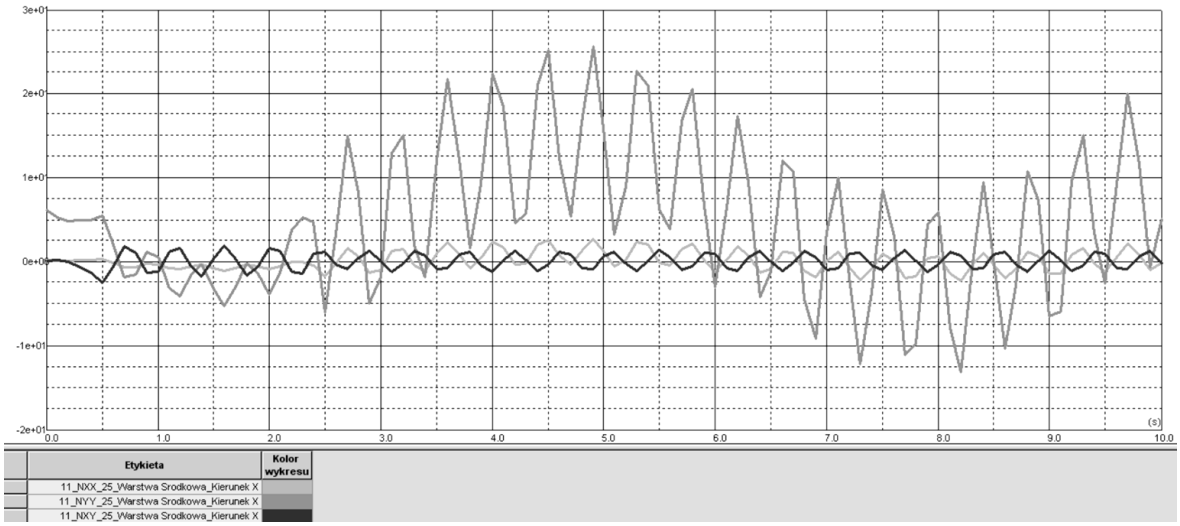
za pomocą przycisków *Dodaj*, *Usuń* i *Modyfikuj* ustalamy jakie wielkości będą prezentowane na wykresach. Wciśnięcie przycisku *Dodaj* powoduje otwarcie okna dialogowego *Definicja wykresu*:



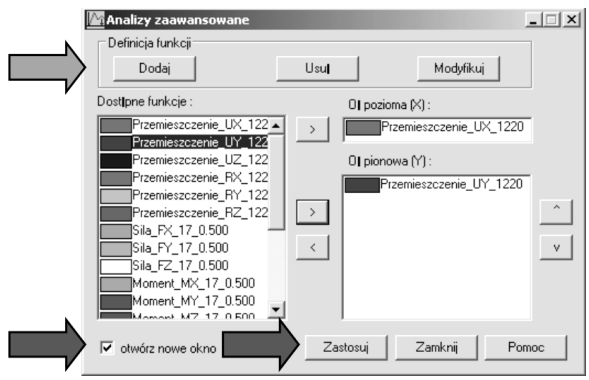
w którym, w zależności od wskazanej zakładki, możemy wybrać wielkość prezentowaną: dla węzłów przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia liniowe oraz kątowe (*Węzeł*) bądź reakcje (*Reakcje*), dla prętów siły przekrojowe lub przemieszczenia w wybranym przekroju (*NTM*), dla elementów powierzchniowych naprężenia lub uogólnione siły przekrojowe w zadanym układzie współrzędnych (*Szczegółowe*) lub w układzie osi głównych (*Ekstremalne*), wielkości zastępcze obliczone według hipotezy HMH (*Złożone*). Na każdej zakładce ponadto podajemy numer obiektu, dla którego dokonamy prezentacji (numer węzła, pręta lub elementu skończonego), nadajemy wyznaczanej zależności nazwę (lub modyfikujemy nazwę zaproponowaną automatycznie). Na zakładce *Parametry* dodatkowo mamy możliwość ustalenia parametrów

prezentacji naprężeń w przypadku konstrukcji powierzchniowych (wybór warstwy). Wciśnięcie przycisku *Dodaj* skutkuje umieszczeniem zdefiniowanej zależności na liście wyboru w oknie dialogowym *Analizy zaawansowane*. Po ustaleniu wszystkich zależności do prezentacji okno *Definicja wykresu* zamykamy przyciskiem *Zamknij*.

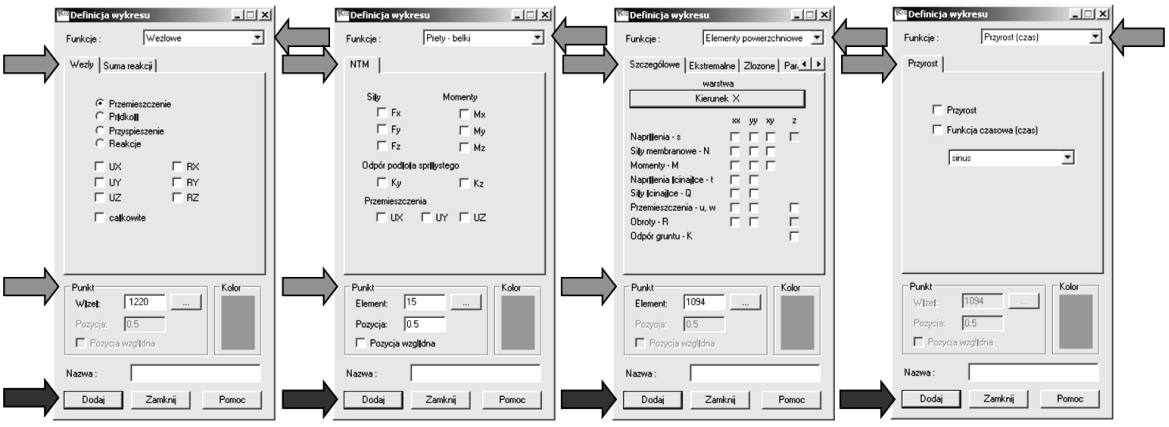
W oknie dialogowym *Równania ruchu*, po wskazaniu myszą, używając przycisków > i >> przenosimy funkcje, które chcemy zaprezentować na jednym wykresie z listy wyboru *Dostępne wykresy* (lewe okno), na listę *Prezentowane wykresy* (prawe okno). Możemy również dokonać operacji odwrotnej za pomocą przycisków < i <<. W przypadku gdy pracujemy na głównym ekranie programu, przed obejrzeniem wykresów musimy jeszcze wybrać opcję *otwórz nowe okno* i przyciskiem *Zastosuj* uruchomić prezentację. W wyniku, w nowym oknie, zobaczymy wykresy pożądanych wielkości wraz z legendą. Przykładowy zestaw wykresów dla wielkości widniejących w oknie dialogowym *Równania ruchu* powyżej wygląda następująco:



W ramach tych samych opcji zaawansowanych mamy możliwość wizualizacji ewolucji wybranych sił przekrojowych, przemieszczeń lub reakcji dla wskazanego pręta, węzła bądź elementu skończonego konstrukcji w dziedzinie innej niż czas (***Rezultaty → Zaawansowane → Wykresy...***). Obsługa okna dialogowego *Analizy zaawansowane*, które się wówczas pojawi:



jest bardzo podobna do obsługi okna dialogowego *Równania ruchu*. Wciśnięcie przycisku *Dodaj* powoduje otwarcie okna dialogowego *Definicja wykresu*:

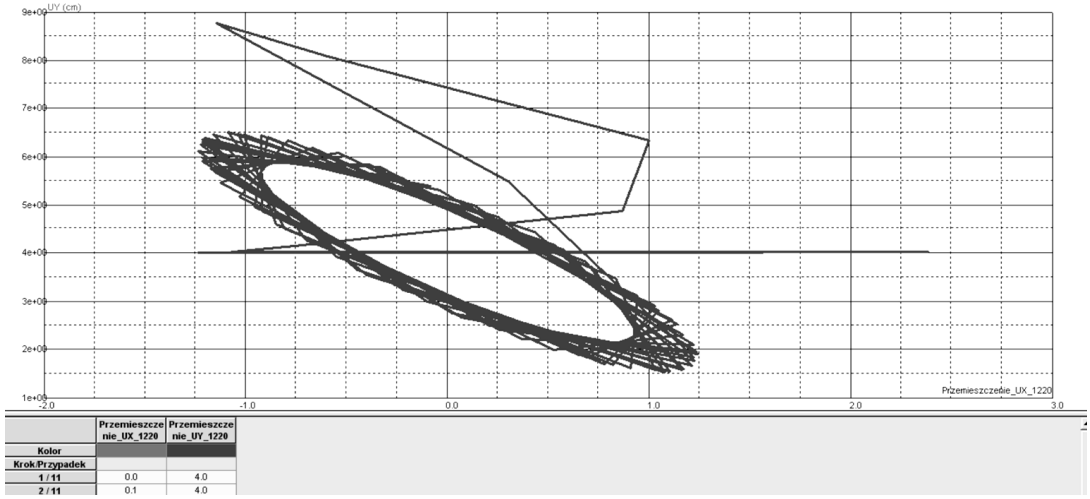


w którym, w zależności od funkcji wybranej z listy wyboru *Funkcja*, możemy wybrać wielkość prezentowaną, wskazać obiekt, dla którego dokonamy prezentacji i nadać lub zmodyfikować nazwę tak utworzonemu zbiorowi wartości. Wciśnięcie przycisku *Dodaj* skutkuje umieszczeniem zdefiniowanej zależności na liście wyboru w oknie dialogowym *Analizy zaawansowane*. Po ustaleniu wszystkich zależności do prezentacji okno *Definicja wykresu* zamykamy przyciskiem *Zamknij*.

W oknie dialogowym *Analizy zaawansowane*, po wskazaniu myszą, za pomocą przycisku > przenosimy funkcje, które chcemy zaprezentować na jednym wykresie z listy wyboru *Dostępne funkcje* (lewe okno), na listę *Oś pionowa (y)* (prawe okno). Możemy również dokonać operacji odwrotnej, używając przycisku <. Wybraną funkcję przyciskiem > wprowadzamy do okna *Oś pozioma (x)*. W przypadku gdy pracujemy na głównym ekranie programu, przed obejrzeniem wykresów musimy jeszcze wybrać opcję *otwórz nowe okno* i przyciskiem *Zastosuj* uruchomić prezentację.

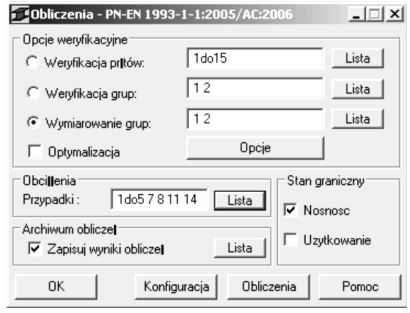
W rezultacie pożądane wielkości zostaną przedstawione w postaci wykresu i zestawienia tabelarycznego. W zestawieniu tabelarycznym wartości, na podstawie których został sporządzony wykres są prezentowane w układzie punkt po punkcie. Krok, z jakim są one prezentowane jest równy krokowi, z jakim jest wykonywana analiza dynamiczna i jest ustalany w oknie dialogowym *Analiza równań ruchu*.

Przykładowy zestaw wykresów dla wielkości widniejących w oknie dialogowym *Analizy zaawansowane* powyżej wygląda następująco:

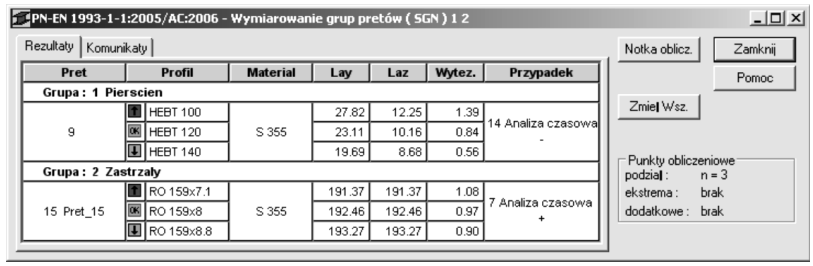


14. Wymiarowanie

Po wyznaczeniu sił przekrojowych możemy przystąpić do weryfikacji nośności profili stalowych przyjętych w naszej konstrukcji. Rozpoczniemy tradycyjnie od przypisania poszczególnym prętom odpowiedniego typu elementu stalowego (***Geometria → Parametry normowe → Typ pręta stalowego/aluminiowego...***). Wszystkim prętom przypiszemy typ *Pręt*. Pręty konstrukcji podzielimy na dwie grupy: pierścień wzmacniający i zastrzały. W pierścieniu dopuścimy optymalizację profili w grupie HEBT, natomiast w zastrzałach w grupie RO (*Ćwiczenie 2*). Po wykonaniu wymiarowania grup prętów (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Obliczenia***) dla następującego zestawu opcji obliczeniowych:



wyniki powinny wyglądać jak niżej:



Pret	Profil	Material	Lay	Laz	Wytez.	Przypadek
Grupa : 1 Pierscien						
9	HEBT 100	S 355	27.82	12.25	1.39	14 Analiza czasowa -
	HEBT 120		23.11	10.16	0.84	
	HEBT 140		19.69	8.68	0.56	
Grupa : 2 Zastrzały						
15 Pret_15	RO 159x7.1	S 355	191.37	191.37	1.08	7 Analiza czasowa +
	RO 159x8		192.46	192.46	0.97	
	RO 159x8.8		193.27	193.27	0.90	

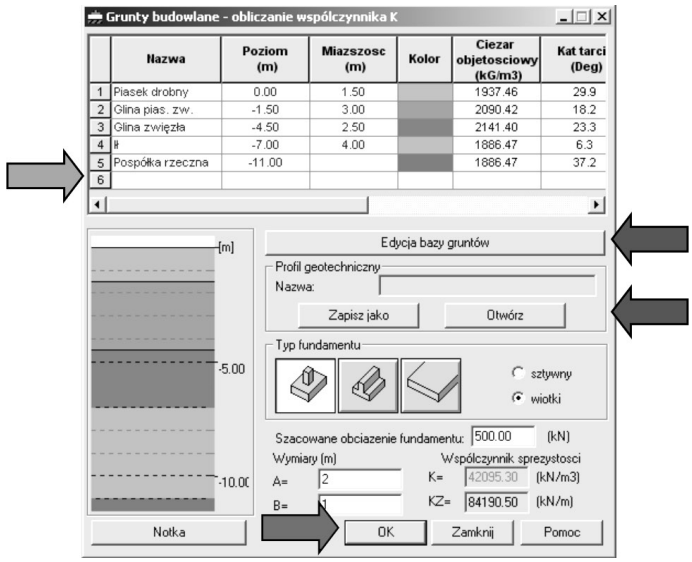
Ćwiczenie 10
Fundamentowanie

Nowe polecenia: Kalkulator gruntów budowlanych, Baza gruntów, Geometria fundamentu, Obciążenie naziomu, Wymiarowanie fundamentu

Współczynnik sprężystości podłoża

W programie ***Robot*** mamy możliwość oszacowania średniego współczynnika sprężystości uwarstwionego podłoża gruntowego na podstawie profilu geologicznego, szacowanego obciążenia i przybliżonych wymiarów fundamentu. Tak wyznaczoną wielkość możemy wprowadzić do obliczeń statycznych jako współczynnik sprężystości podpory podatnej.

1. Wprowadzenie profilu geologiczneg
Uruchamiamy kalkulator gruntów budowlanych (***Narzędzia → Grunty budowlane – kalkulator***). W oknie dialogowym *Grunty budowlane – obliczanie współczynnika K* wprowadzamy profil geologiczny gruntu, dla którego chcemy wykonać obliczenia:



podając warstwy podłoża gruntowego w kolejności od poziomu terenu w dół. Dla każdej wprowadzonej warstwy mamy możliwość określenia: poziomu stropu i spągu, miąższości oraz charakterystycznej nośności gruntu. Nowe warstwy wprowadzamy do tabeli, klikając lewym klawiszem myszy pole *Nazwa* w ostatnim (pustym) wierszu tabeli. Z listy wyboru, która się wówczas ujawni wybieramy właściwą nazwę gruntu. Na tej podstawie program, automatycznie, uzupełni pozostałe kolumny tabeli, jednak mamy możliwość korekty tych wielkości, które w tabeli wpisane są niebieskim kolorem.

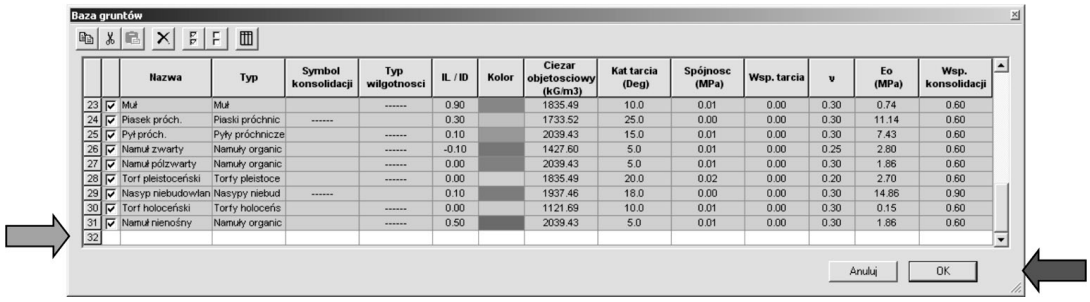
2. Import/eksport profilu geologicznego
Po wprowadzeniu profilu geologicznego mamy możliwość zapisania go w formacie **.mdb** zgodnym z standardem bazy danych programu **MSAccess** za pomocą przycisku *Zapisz jako*. Otwiera się wówczas standardowe okno dialogowe systemu operacyjnego *Zapisz jako*. Oczywiście możliwe jest również wczytanie profilu geologicznego z pliku bazy danych zapisanego w formacie **.mdb**.

3. Wyznaczenie współczynnika sprężystości
Po wprowadzeniu profilu gruntu wybieramy typ fundamentu (stopa, ława, płyta) oraz określamy, czy fundament ma być traktowany jako sztywny (stempel wciskany w grunt) czy wiotki. Następnie wprowadzamy szacowane obciążenie fundamentu w jednostkach stosownych do typu i podajemy przybliżone wymiary *A* (długość) i *B* (szerokość). Po wprowadzeniu wszystkich danych wystarczy wcisnąć przycisk *OK*, aby spowodować obliczenie współczynników sprężystości *K* i *KZ*.

W każdej chwili po wykonaniu obliczeń mamy możliwość utworzenia notki obliczeniowej dokumentującej ich przebieg, za pomocą przycisku *Notka*.

4. Edycja bazy gruntów

W standardowej bazie gruntów dołączanej do programu zdefiniowano 31 rodzajów gruntów, z którymi możemy się najczęściej spotkać w praktyce inżynierskiej. Jednak gdyby ta baza okazała się niewystarczająca, mamy możliwość dodania nowych rodzajów gruntu. Dokonujemy tego za pomocą przycisku *Edytuj bazę gruntów*. Wciśnięcie tego przycisku powoduje otwarcie okna dialogowego *Baza gruntów*, w którym możemy dodawać kolejne pozycje na liście zdefiniowanych rodzajów gruntów, za każdym razem rozpoczynając działanie od kliknięcia lewym klawiszem myszy w polu *Nazwa* w ostatnim (pustym) wierszu tabeli.



UWAGA: Kalkulator gruntów budowlanych dostępny jest również bezpośrednio z okna definicji podpory sprężystej (***Geometria → Podpory...***).

Stopa lub ława fundamentowa

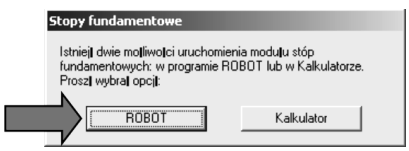
W przypadku konstrukcji stalowych przed przystąpieniem do projektowania części żelbetowej fundamentów pożądane jest wykonanie wymiarowania profili (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie prętów stalowych/aluminiowych → Obliczenia...***) oraz podstaw słupów wraz z zakotwieniem (***Analiza → Wymiarowanie konstrukcji prętowych → Wymiarowanie połączeń stalowych → Obliczenia...***), gdyż ich wymiary determinują niektóre wymiary części żelbetowej fundamentu.

1. Wczytanie poprzednio rozwiązanej konstrukcji

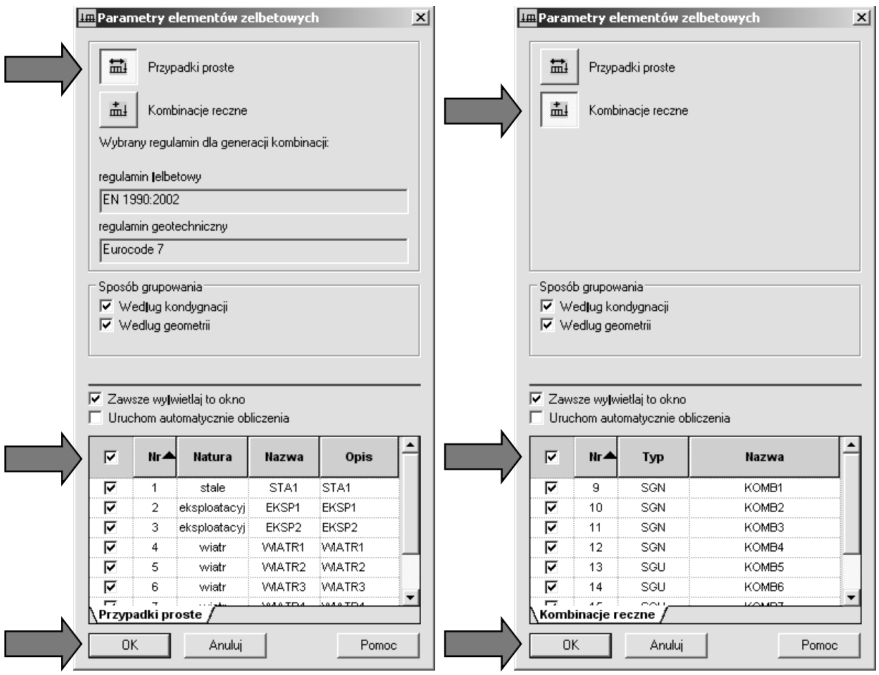
Obliczenia stopy fundamentowej wykonamy dla zadania projektowego rozwiązanego w Ćwiczeniu 3 (plik *Konstrukcja3.rtd*), które wczytujemy z pliku (***Plik → Otwórz projekt...***).

2. Definicja obciążeń

Po otwarciu stosownego pliku uruchamiamy moduł wymiarowania fundamentów (***Analiza → Wymiarowanie elementów żelbetowych → Wymiarowanie fundamentów***). Zanim przystąpimy do obliczeń fundamentu, musimy zdecydować, czy obliczenia te będziemy prowadzić w programie ***Robot***, czy w programie ***Kalkulator fundamentów***, który stanowi niezależny komponent obliczeniowy:



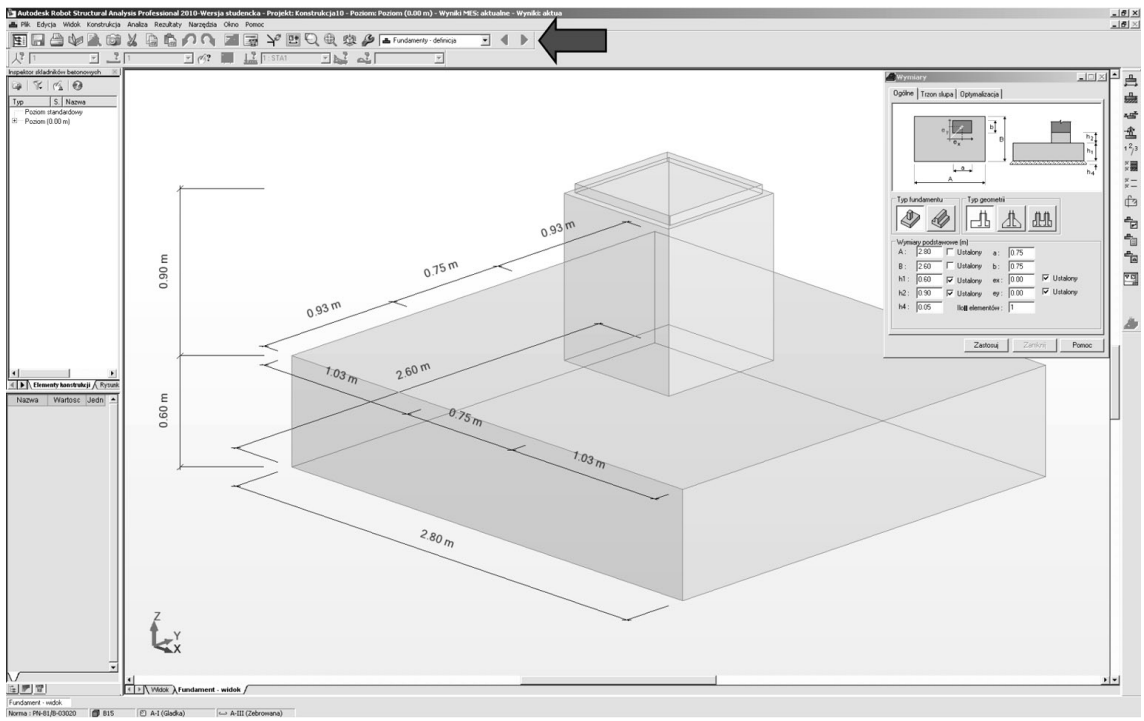
My wybierzemy ścieżkę projektowania w systemie ***Robot***. i przeprowadzimy obliczenia dla węzła 1.



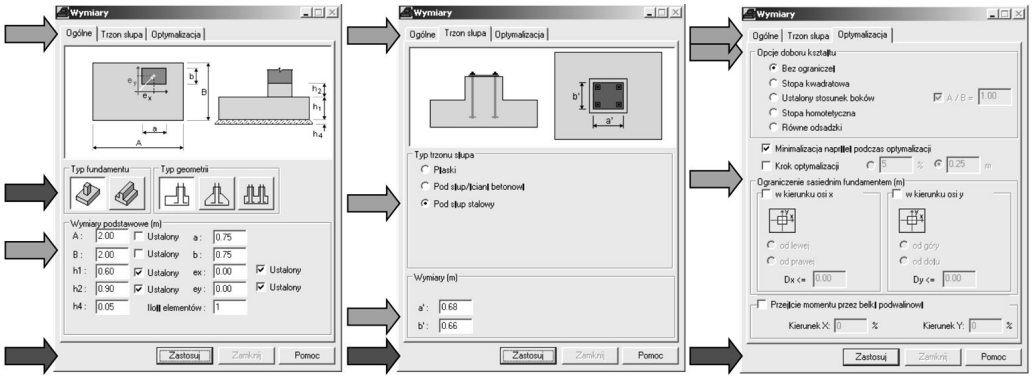
W pierwszym kroku (okno dialogowe *Parametry elementów żelbetowych*) decydujemy, czy do modułu projektowania fundamentów przekazujemy dane dotyczące prostych przypadków obciążenia czy też kombinacji ręcznych (ta opcja dostępna jest tylko wtedy, gdy na etapie definiowania obciążeń takie kombinacje zostały określone (***Obciążenia → Kombinacje ręczne...***)). Na liście dostępnej w dolnej części okna dialogowego możemy dokonać wyboru tych przypadków obciążenia (kombinacje automatyczne) bądź kombinacji przypadków prostych (kombinacje ręczne), dla których będzie prowadzona weryfikacja nośności fundamentu w trakcie dalszych obliczeń. Obliczenia przeprowadzimy dla wszystkich kombinacji zdefiniowanych ręcznie, więc po dokonaniu stosownego wyboru zatwierdzimy go przyciskiem *OK* bez wprowadzania jakichkolwiek zmian na liście kombinacji.

3. Definicja geometrii

W drugiej kolejności, na ekranie ***Fundamenty – definicja***,



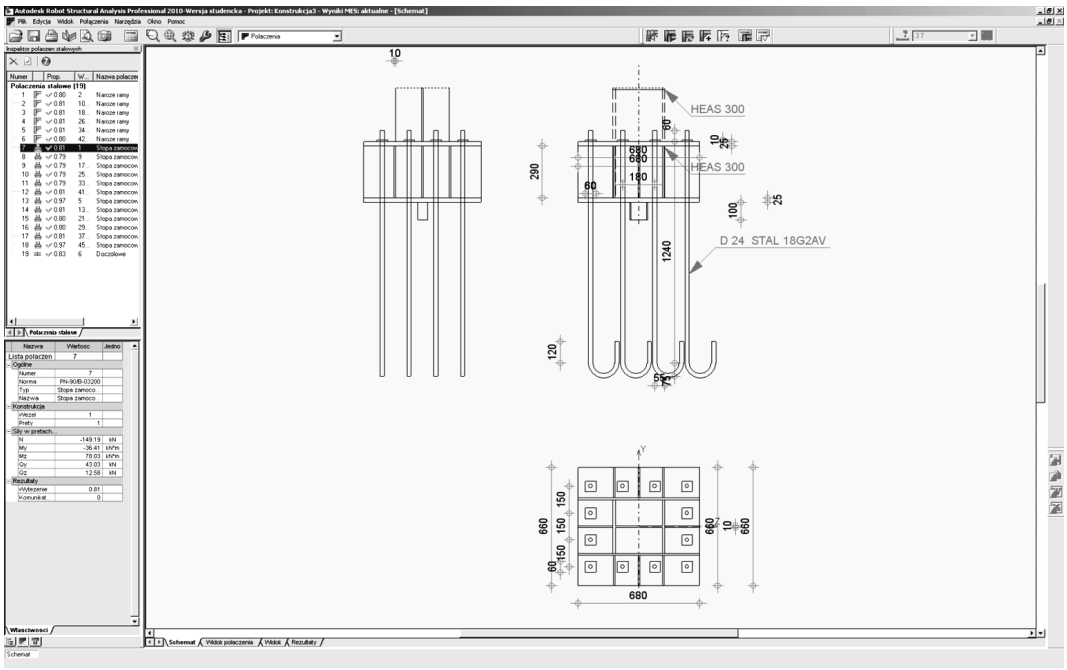
do którego zostaniemy automatycznie przeniesieni po zamknięciu okna dialogowego *Parametry elementów żelbetowych*, na kolejnych zakładkach okna dialogowego *Wymiary*, określamy typ i wstępne wymiary fundamentu (*Ogólne*), typ (stalowy lub żelbetowy) i wymiary trzonu słupa (*Trzon słupa*) oraz parametry geometryczne optymalizacji (ograniczenia na proporcje boków) przy automatycznym korygowaniu wymiarów fundamentu (*Optymalizacja*):



Wybór opcji **Ustalony** na zakładce *Ogólne* przy którymkolwiek wymiarze oznacza, że wymiar ten nie może zostać automatycznie zmieniony w trakcie dalszych obliczeń. Jak zwykle, po wprowadzeniu danych akceptujemy je przyciskiem *Zastosuj*. Wciśnięcie tego przycisku powoduje aktualizację wymiarów na szkicu fundamentu widocznym w głównym oknie programu.

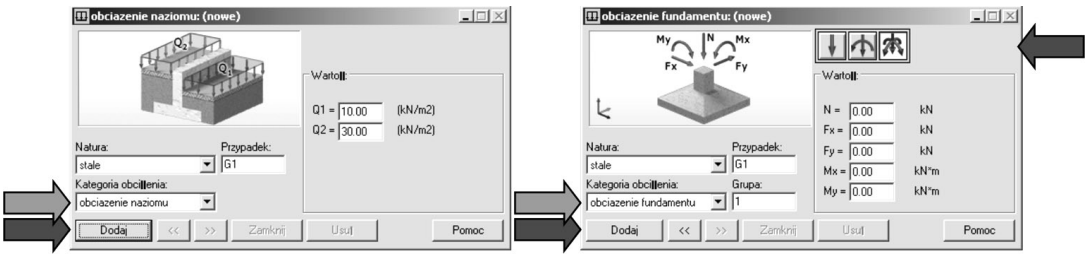
UWAGA: Wymiary *a* i *b* na zakładce *Ogólne* oraz wymiary *a'* i *b'* na zakładce *Trzon słupa* są ze sobą związane i nie można ich przyjmować dowolnie.

W naszym przypadku (zakładka *Ogólne*) wybierzemy *Typ fundamentu* – stopa, *Typ geometrii* – prostokątna obciążona jednym słupem, ponadto przyjmiemy, że wysokość stopy $h1$ będzie równa **0,60** m, a wysokość trzonu $h2$ **0,90** m, co odpowiada głębokości posadowienia 1,50 m poniżej poziomu terenu. Przyjmiemy, że oba te wymiary, oraz mimośrody e_x i e_y trzonu względem stopy, równe **0,00** m, są **Ustalone** (czyli nie będą podlegały zmianom w trakcie optymalizacji wymiarów stopy). Biorąc pod uwagę zaprojektowane wcześniej wymiary podstawy słupa stalowego w węźle 1 (patrz rysunek poniżej), przyjmiemy wymiary *a* i *b* równe **0,75** m, a wymiary *a'* i *b'* (zakładka *Trzon słupa*) odpowiednio równe **0,68** m i **0,66** m. Ze względu na znaczną odległość innych elementów konstrukcji od projektowanej stopy, a co za tym idzie znikome prawdopodobieństwo kolizji, nie będziemy wprowadzać żadnych ograniczeń na wymiary fundamentu ani na jego położenie na planie konstrukcji (zakładka *Optymalizacja*), co jednakże nie zwalnia nas z obowiązku sprawdzenia, po zaprojektowaniu wszystkich pobliskich elementów, czy warunki poprawnego ich rozmieszczenia względem elementów sąsiednich są spełnione.



4. Obciążenia dodatkowe (naziomu)

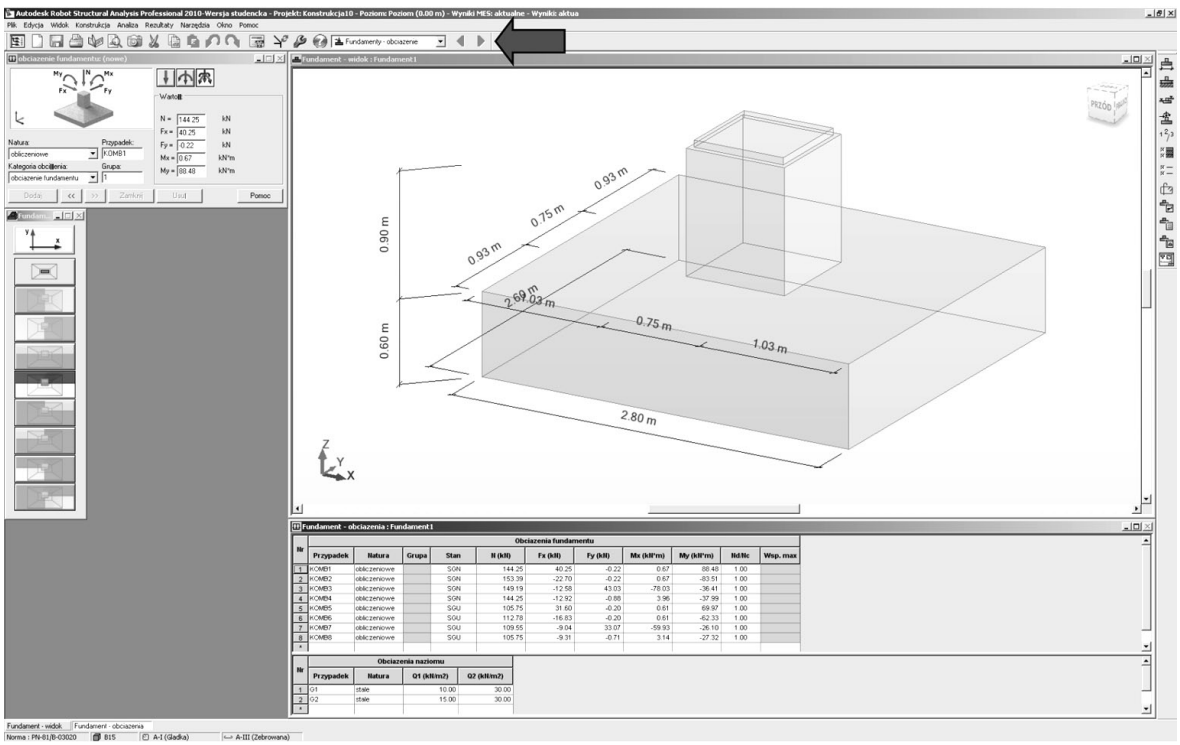
Obciążenie naziomu w otoczeniu fundamentu definiujemy, korzystając z opcji wprowadzania dodatkowych obciążeń fundamentu (***Konstrukcja → Obciążenia...***). W oknie dialogowym *Obciążenie fundamentu (nowe)* z listy rozwijalnej *Kategoria obciążenia* wybieramy **obciążenie naziomu** i wówczas mamy możliwość zdefiniowania nowych przypadków obciążenia:



dla których winniśmy podać, tak jak dla każdego innego przypadku obciążenia, *Naturę* (stałe lub eksploatacyjne), *Przypadek* i *Wartość*. W tym samym oknie dialogowym w razie potrzeby możemy zdefiniować nowe przypadki obciążenia trzonu fundamentu, wybierając **obciążenie fundamentu** z listy rozwijalnej *Kategoria obciążenia*. Podajemy wówczas, tak jak w przypadku obciążenia naziomu, *Naturę* (stałe, eksploatacyjne, wiatr, śnieg, temperatura, obliczeniowe), *Przypadek*, *Grupę* i *Wartość* (wybierając rodzaj i liczbę sił przekrojowych za pomocą ikon w górnej części okna) obciążenia. Ponadto w razie potrzeby, używając przycisków << i >>, możemy przeglądnąć wszystkie zdefiniowane przypadki obciążenia i ewentualnie dokonać modyfikacji wartości sił przekrojowych skojarzonych z nimi.

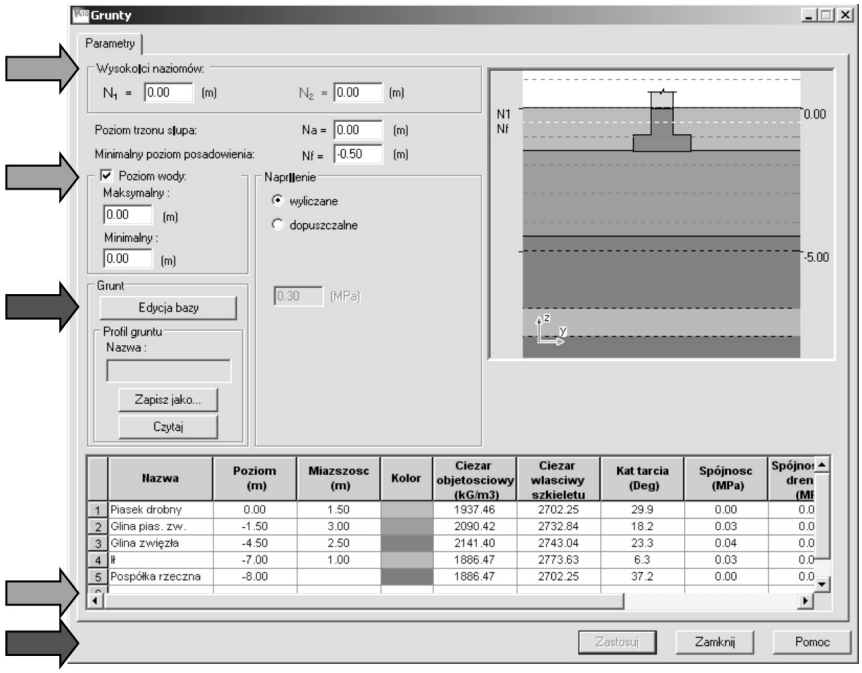
Jeżeli w otoczeniu trzonu fundamentu występują dwie strefy różniące się wartością obciążenia naziomu, ich położenie ustalamy w oknie dialogowym *Położenie* (***Konstrukcja → Położenie...***), wskazując stosowny rozkład stref kursorem myszy i zatwierdzając wybór lewym przyciskiem. Tak wybrany rozkład obowiązuje dla wszystkich zadanych przypadków obciążenia naziomu w otoczeniu projektowanego fundamentu.

Operacje wymienione powyżej najwygodniej wykonuje się na ekranie ***Fundamenty – obciążenie***, na którym w oknie dialogowym i tabeli mamy bezpośredni dostęp do wszystkich obciążeń, które będą brane pod uwagę w trakcie obliczeń.



5. Definicja profilu geologicznego

W kolejnym etapie, w oknie dialogowym *Fundamenty – grunt* (***Konstrukcja → Grunt...***) wprowadzamy dane dotyczące położenia naziomów w stosunku do poziomu 0,00, poziomu wody gruntowej, metody oznaczania parametrów geotechnicznych oraz parametrów profilu geologicznego:

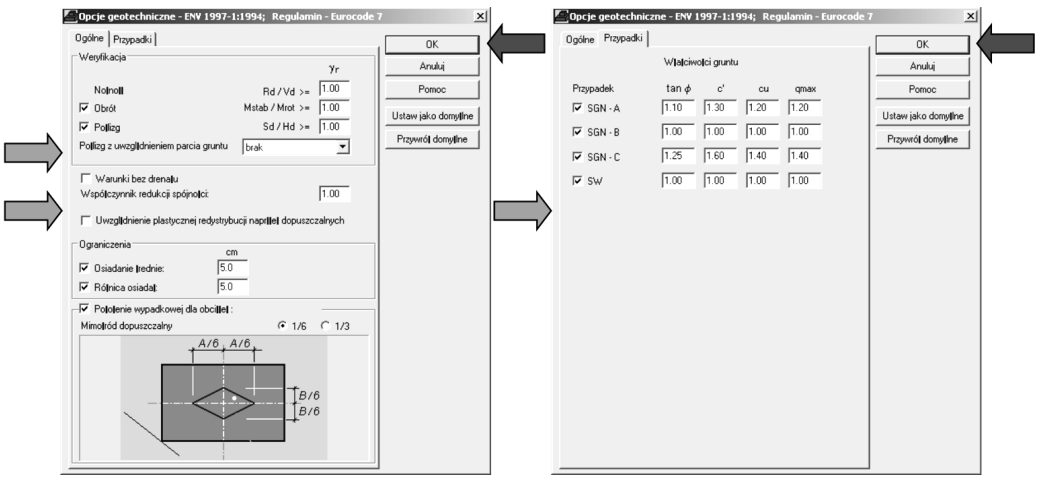


Warstwy profilu geologicznego wprowadzamy do tabeli widocznej w dolnej części okna dialogowego w identyczny sposób jak w przypadku kalkulatora gruntów budowlanych (patrz punkt 1 w poprzednim dziale). Tak samo możemy również dokonać importu lub eksportu profilu z/do pliku dyskowego w formacie **.mdb** (punkt 2 w poprzednim dziale). Również w taki sam sposób (punkt 4 w poprzednim dziale) możemy przeprowadzić edycję bazy gruntów zawierającej parametry geotechniczne podstawowych rodzajów gruntów budowlanych spotykanych w Polsce (przycisk *Edycja bazy*). Wprowadzone dane są na bieżąco prezentowane w oknie graficznym.

W rozważanym przez nas przypadku przyjmiemy *Wysokości naziomów* N_1 i N_2 równe **0,00** m, *Poziom trzonu słupa* N_a także równy **0,00** m, *Poziom wody* gruntowej równy **–5,00** m, *Naprężenia* w podłożu gruntowym będą **wyliczane**. Wprowadzone wartości akceptujemy przyciskiem *Zastosuj*, co spowoduje uaktualnienie rysunku w oknie graficznym.

6. Analiza

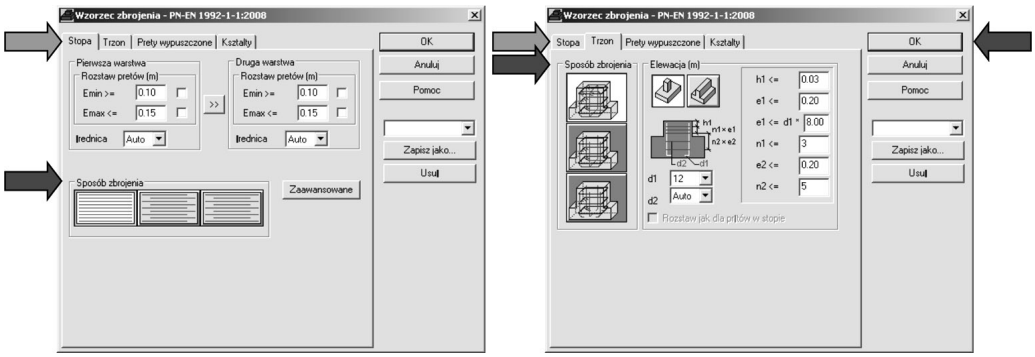
Przed rozpoczęciem właściwego wymiarowania fundamentu musimy jeszcze ustalić dodatkowe parametry dotyczące weryfikacji jego nośności, w oknie dialogowym *Opcje geotechniczne* (***Analiza → Opcje geotechniczne...***):



W szczególności ustalamy tu wartości współczynników bezpieczeństwa ze względu na nośność, obrót i poślizg, określamy różnicę osiadań i osiadanie średnie. Ponadto określamy, we wnętrzu którego rdzenia podstawy fundamentu winna się mieścić wypadkowa od obciążeń. Ustalone wartości akceptujemy przyciskiem *OK*, który zamyka okno.

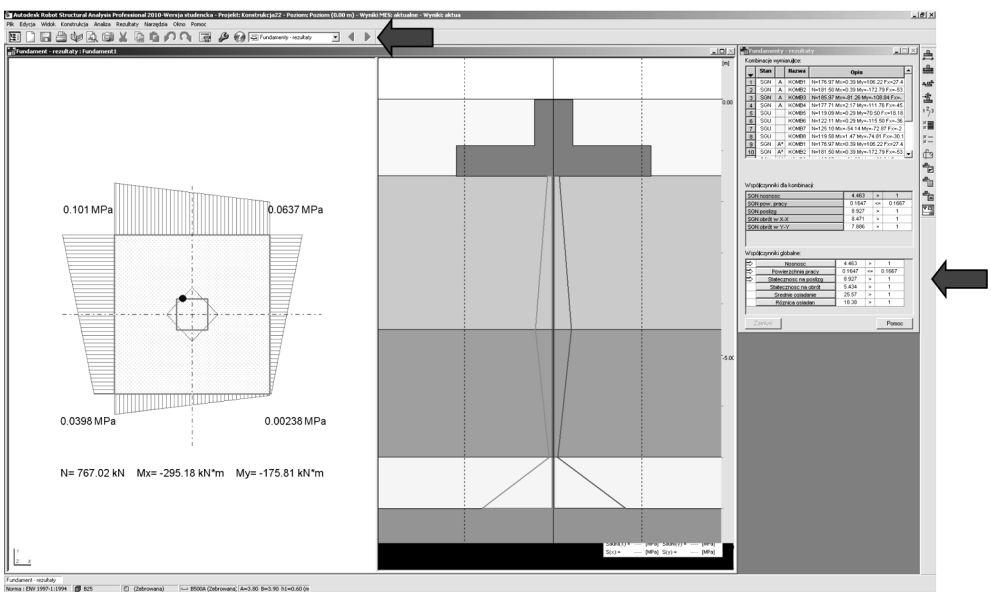
W naszym przypadku przyjmiemy standardowe wartości wszystkich współczynników za wyjątkiem *Osiadania średniego*, które ograniczymy do **5,0** cm, oraz *Różnicy osiadań*, którą przyjmiemy równą **5,0 cm**. Nie będziemy wprowadzać żadnych zmian w dziale właściwości gruntu.

Ponadto na kolejnych zakładkach okna dialogowego *Opcje obliczeniowe* (***Analiza → Opcje obliczeniowe...***) możemy ustalić: grubość otuliny zbrojenia stopy i zadecydować o weryfikacji jej nośności na przebicie (*Ogólne*), parametry zastosowanego betonu (*Beton*), klasę oraz dopuszczalne średnice prętów zbrojenia głównego (*Zbrojenie podłużne*) i zbrojenia poprzecznego (*Zbrojenie poprzeczne*). Dalej, na kolejnych zakładkach okna dialogowego *Wzorzec zbrojenia* (***Analiza → Parametry zbrojenia...***) precyzujemy sposób rozmieszczania zbrojenia w stopie, czyli minimalny i maksymalny rozstaw prętów zbrojeniowych i sposób ich układania (*Stopa*), parametry zbrojenia trzonu (otulina, średnice i rozmieszczenie prętów poziomych i pionowych) (*Trzon*), ustalamy obecność i kształt prętów wypuszczanych w wypadku łączenia ze słupem żelbetowym (*Pręty wypuszczone*) oraz kształty wkładek (*Kształty*).

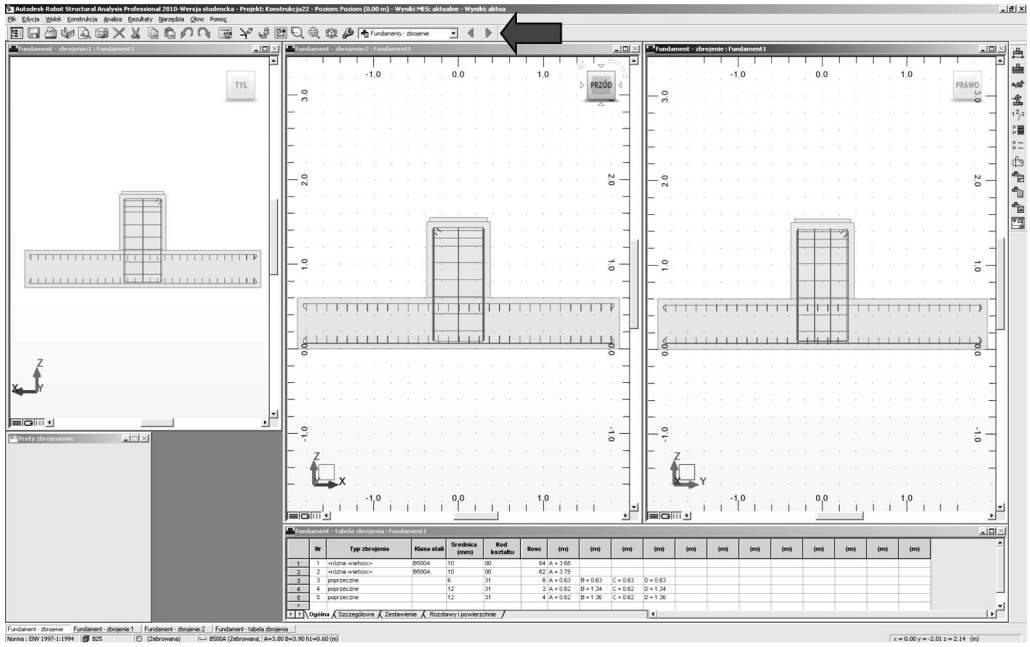


Po ustaleniu opcji geotechnicznych, obliczeniowych i parametrów zbrojenia uruchamiamy obliczenia (***Analiza → Obliczenia***).

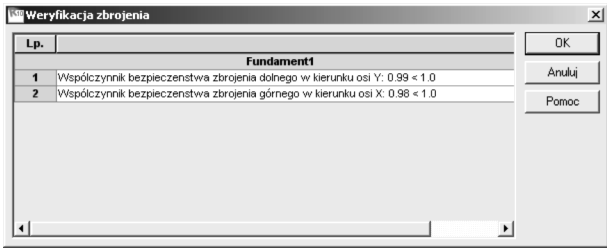
Po wykonaniu obliczeń, na ekranie ***Fundamenty – rezultaty*** możemy obejrzeć ich podsumowanie w postaci zestawienia tabelarycznego kombinacji wymiarujących w oknie dialogowym *Fundamenty – rezultaty*. Wskazanie w tym oknie wybranej kombinacji powoduje wyświetlenie skojarzonych z nią współczynników bezpieczeństwa w oknie *Współczynniki dla kombinacji* oraz graficzną prezentację odpowiadających im rozkładów naprężeń normalnych pod stopą w planie i przekroju, wraz z zaznaczeniem położenia wypadkowej w obrębie fundamentu. Jeżeli w oknie *Współczynniki globalne* w którymkolwiek wierszu pojawia się żółta strzałka, oznacza to, że wskazana kombinacja jest kombinacją miarodajną ze względu na wyróżniony współczynnik. Po umieszczeniu kursora myszy w oknie zawierającym profil geotechniczny, możemy odczytać obliczone wartości naprężeń w gruncie na wskazanej nim głębokości.



Proponowane przez program rozmieszczenie prętów zbrojeniowych w widoku i dwóch prostopadłych przekrojach możemy obejrzeć na ekranie ***Fundamenty – zbrojenie***, wraz z zestawieniem tabelarycznym wszystkich prętów:

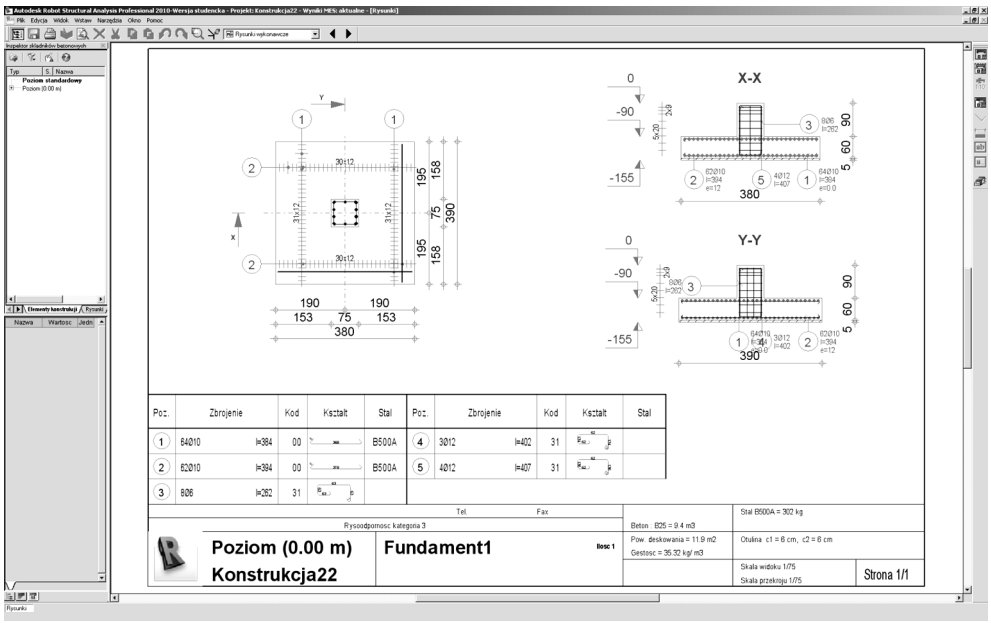


Podobnie jak w przypadku płyty (*Ćwiczenie 5*) czy belki i słupa (*Ćwiczenie 6*) mamy możliwość dokonania modyfikacji tego zbrojenia, jednak w takim przypadku należy bezwzględnie pamiętać o powtórzeniu weryfikacji zbrojenia (***Analiza → Weryfikacja...***) i w razie wystąpienia problemów:



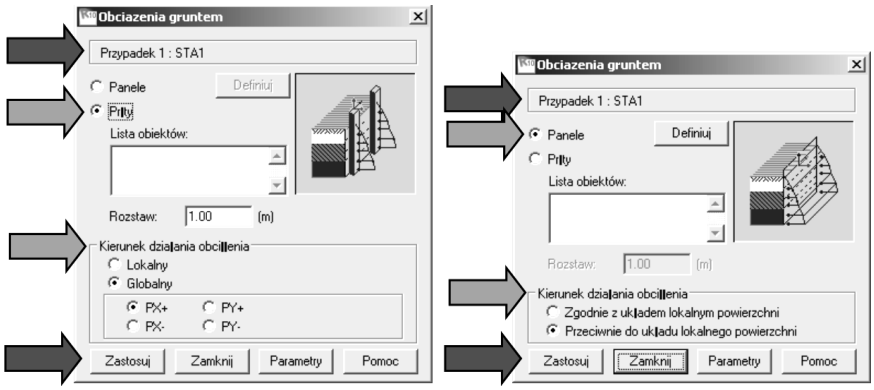
przeprojektowaniu go.

Po zakończeniu obliczeń możemy przejść do tworzenia rysunków wykonawczych (***Rezultaty → Rysunki***).

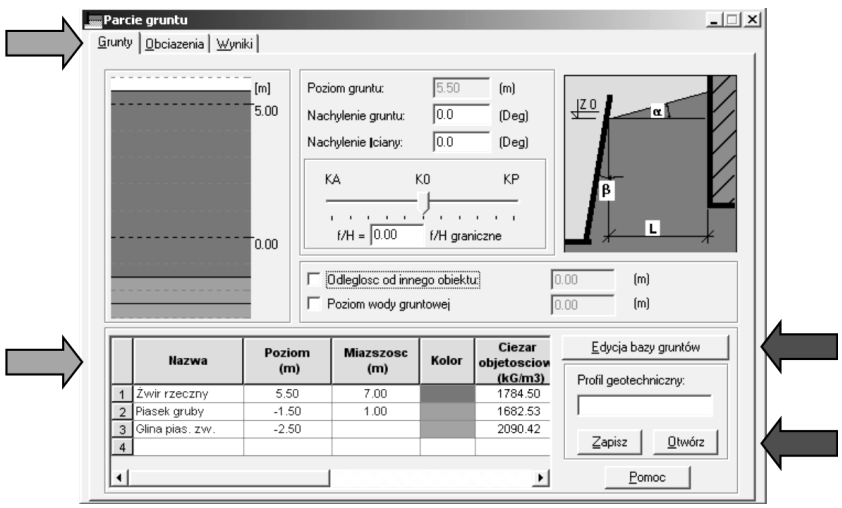


Obciążenie parciem gruntu

W programie ***Robot*** możliwe jest automatyczne wyznaczenie obciążenia konstrukcji zagłębionej w gruncie parciem gruntu wywołanym jego ciężarem i obciążeniem naziomu. Oprócz parcia spoczynkowego *K*0 można wyznaczyć zarówno parcie czynne *KA* (zredukowane pod wpływem przemieszczania się konstrukcji w kierunku zgodnym z kierunkiem działania naporu gruntu), jak i parcie bierne *KP* (zwiększone na skutek przemieszczania się konstrukcji w kierunku przeciwnym do kierunku działania naporu gruntu, np. pod wpływem innych obciążeń przyłożonych do konstrukcji). Stosowny moduł programu uruchamiamy po określeniu przypadków obciążeń działających na konstrukcję (***Obciążenia → Przypadki...***) związanych z interakcją z podłożem gruntowym. Najpierw wybieramy właściwy przypadek obciążenia z listy rozwijalnej na pasku stanu, a następnie uruchamiamy moduł wyznaczania naporu (***Obciążenia → Obciążenia specjalne → Parcie gruntu...***).

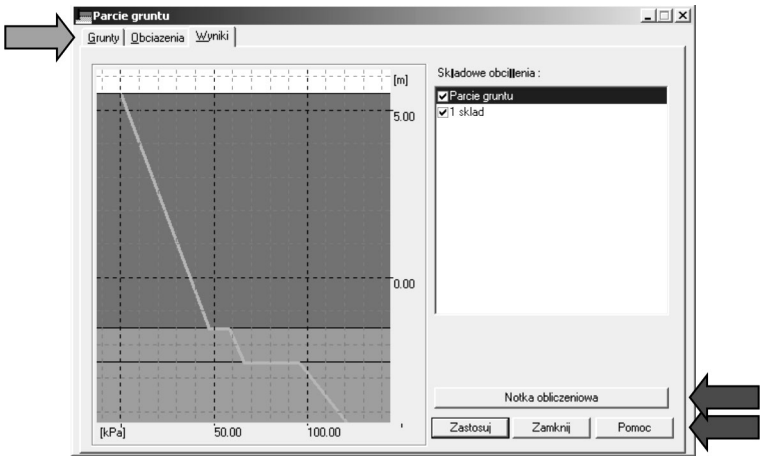


W rezultacie na ekranie pojawi się okno dialogowe *Obciążenia gruntem* (powyżej), którego postać zależy od tego, czy będziemy obliczać obciążenia działające na obiekty liniowe (pręty – lewy rysunek), czy też powierzchniowe (panele – prawy rysunek). Po zweryfikowaniu, że definiowane obciążenie jest przypisane do właściwego przypadku obciążenia (górna strzałka), wybieramy typ elementu konstrukcyjnego, w oknie dialogowym *Lista obiektów* znanymi sposobami wprowadzamy numery elementów konstrukcyjnych właściwego typu, w grupie *Kierunek działania obciążenia* wybieramy właściwy kierunek i na zakończenie przyciskiem *Parametry* przechodzimy do okna dialogowego *Parcie gruntu*:



w którym określamy na kolejnych zakładkach dane geotechniczne (*Grunt*), parametry obciążenia naziomu (*Obciążenia*) i oglądamy wyniki obliczeń (*Wyniki*). Na zakładce *Grunt* przede wszystkim określamy w tabeli miąższości warstw gruntu w odniesieniu do poziomu 0,00. Zasady wprowadzania danych do tabeli są identyczne jak w przypadku obliczania współczynnika sprężystości podłoża (powyżej). Podobnie możemy również wczytać profil geologiczny z pliku w formacie **.mdb** lub zapisać do niego oraz w razie potrzeby uzupełnić bazę gruntów. Dalej określamy tu nachylenie gruntu i elementu obciążanego (rysunek), wybieramy tryb pracy gruntu

w związku z przemieszczeniem elementu oporowego oraz podajemy poziom wody gruntowej i odległość od innego obiektu w otoczeniu (jeżeli taki obiekt występuje). Na zakładce *Obciążenia* wybieramy typ obciążenia (liniowe, pasmo lub półprzestrzeń) oraz określamy jego parametry, takie jak nazwa, odległość od korony elementu obciążanego i wielkość. Wreszcie na zakładce *Wyniki* możemy obejrzeć rozkłady naporów dla poszczególnych obciążeń:



oraz w oknie *Składowe obciążenia* wybrać z listy wszystkich zdefiniowanych przypadków obciążenia gruntem i obciążenia naziomu te, których kombinacja zostanie przyłożona do konstrukcji w ramach przypadku obciążenia wskazanego na liście rozwijalnej przypadków głównego okna programu.

UWAGA: Rysunek rozkładu naporu na głębokości jest prezentowany dla składowej wskazanej na niebiesko, a nie dla kombinacji.

Po wyborze składowych obciążenia przyciskiem *Notka obliczeniowa* możemy utworzyć notatkę zawierającą krótkie podsumowanie obliczeń. Obliczone obciążenia przekazujemy do modułu obciążeń gruntem przyciskiem *Zastosuj*. Przycisk ten zamyka okno dialogowe *Parcie gruntu*. Ponowne użycie przycisku *Zastosuj* w oknie dialogowym *Obciążenia gruntem* powoduje przyłożenie obciążenia do konstrukcji.

Literatura

Podstawowymi podręcznikami, dostępnymi dla studentów w formie elektronicznej bezpłatnie na stronie producenta oprogramowania (students.autodesk.com) są:

[1] *Autodesk Robot Structural Analysis 2010. User manual*, Autodesk Corp., 2009 (język angielski).

oraz:

[2] *Autodesk Robot Structural Analysis. Metric Getting Started Guide*, Autodesk Corp., 2010 (język angielski).
[3] *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2009. Training Manual – Metric version*, Autodesk Corp., 2010 (język angielski).

Istnieje również polska wersja podręcznika [1]:

[4] *Autodesk Robot Structural Analysis 2010. Podręcznik użytkownika*, Autodesk Corp., 2009.

Osoby zainteresowane pogłębieniem swoich wiadomości na temat podstaw teoretycznych Metody Elementów Skończonych mogą skorzystać z jednego z wielu dostępnych na rynku podręczników z tego zakresu, np.:

[5] Bąk R., Burczyński T., *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2009.
[6] Rakowski G., *Metoda Elementów Skończonych. Wybrane problemy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
[7] Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda Elementów Skończonych w Mechanice Konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.

bądź też z należących do klasyki gatunku podręczników anglojęzycznych:

[8] Fish J., Belytschko T., *A First Course in Finite Elements*, Wiley, 2007.
[9] Reddy J.N., *An Introduction to the Finite Element Method (engineering series)*, McGraw-Hill, 2005.
[10] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*, Butterworth-Heineman, 2005.

Zainteresowani szczególnymi aspektami zastosowań Metody Elementów Skończonych w modelowaniu konstrukcji inżynierskich wiele cennych informacji na ten temat mogą znaleźć np. w:

[11] Starosolski W., *Konstrukcje żelbetowe według PN-B-03264:2002 i Eurokodu 2*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2009.
[12] Kapela M., Sieczkowski J., *Projektowanie konstrukcji budynków wielokondygnacyjnych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2003.
[13] Starosolski W., *Wybrane zagadnienia komputerowego modelowania konstrukcji inżynierskich*, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 2003.
[14] Rusiński E., Czmochowski J., Smolnicki T., *Zaawansowana Metoda Elementów Skończonych w konstrukcjach nośnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.

Informacje na temat metod numerycznych będących podstawą wszelkich obliczeń prowadzonych na maszynach cyfrowych, których zrozumienie jest bardzo istotne ze względu na umiejętność poprawnej interpretacji uzyskanych wyników, dostępne są np. w:

[15] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J., *Metody numeryczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2009.
[16] Szatkowski A., Cichosz J., *Metody numeryczne*, Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej, 2008.
[17] Kosma Z., *Metody numeryczne dla zastosowań inżynierskich*, Wydawnictwa Politechniki Radomskiej, 2007.
[18] Majchrzak E., Mochnacki B., *Metody numeryczne: podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy*, Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 1996.
[19] *Metody numeryczne: skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych*, red. D. Zboś, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, 1995.
[20] Bjorck A., Dahlquist G., *Metody numeryczne*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, 1987.

Normy przywoływane w poszczególnych ćwiczeniach to:

[21] PN-EN 1991-1-3/4:2005 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 1–3: Oddziaływania ogólne. Obciążenie śniegiem.
[22] PN-EN 1992-1-1:2008 – Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
[23] PN-EN 1993-1-1:2005/AC:2006 – Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.
[24] EN:1993-1-8:2005 – Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1–8: Projektowanie połączeń.
[25] ENV 1997-1:1994 – Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Reguły ogólne.

Robobat®
CONSTRUCTIVE SPIRIT

Robobat Polska Sp. z o.o.
ul. Radzikowskiego 47A, 31-315 Kraków
tel.: 12 639 25 00, handel@robobatpolska.pl

OPROGRAMOWANIE

Dostarczamy rozwiązania z zakresu:

- konstrukcji i architektury;
- instalacji budowlanych i przemysłowych;
- mechaniki i infrastruktury;
- zarządzania dokumentacją i procesem projektowania;
- budownictwa ekologicznego;

WSPARCIE TECHNICZNE

- wyspecjalizowane zespoły inżynierskie;
- indywidualna konfiguracja oprogramowania;
- sprawna i szybka pomoc merytoryczna;

WDROŻENIA I CONSULTING

- integracja oprogramowania inżynierskiego;
- optymalizacja procesów projektowych;
- wiedza ekspercka i doświadczenie;
- asysta projektowa;

SZKOLENIA

Szkolenia w Centrum Szkoleniowym Robobat Polska zapewniają:

- pełne wykorzystanie potencjału zakupionego oprogramowania;
- wzrost efektywności pracy zespołu;
- przewagę konkurencyjną na rynku;

APLIKACJE WŁASNE

Tworzymy aplikacje działające samodzielnie lub rozszerzające funkcjonalność standardowych wersji oprogramowania Autodesk. W ofercie:

- REX – rozszerzenia do programów Revit i Robot;
- MASTER – rodzina kalkulatorów – Eurokody;
- EXPERT – rodzina kalkulatorów – PN;
- ProGREEN – optymalizacja energetyczna budynku;

SPRZĘT KOMPUTEROWY

- analiza infrastruktury informatycznej Klienta;
- konfiguracja sprzętu zapewniająca stabilność i maksymalną wydajność;
- sprzęt renomowanych producentów;

KOMPLEKSOWE ROZWIĄZANIA

Autodesk Gold Partner

Autodesk Authorized Developer Authorized Training Center

Autodesk Consulting Specialized

2013 GOLD hp Specialist